

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

## **“SIMULACIÓN DE UNA RED NÚCLEO CON MPLS PARA SERVICIO *TRIPLE PLAY* PARA UN OPERADOR DE TELECOMUNICACIONES EN LA PROVINCIA DEL AZUAY”**

### **AUTORES:**

Angélica María Cabrera Idrovo

David Esteban Farfán Guillén

### **DIRECTORA:**

Ing. Sofía Priscila Arévalo Maldonado

Tesis previa a la obtención del Título  
de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

CUENCA - ECUADOR

2015-2016

---

## RESUMEN

El principal objetivo del proyecto de tesis es elaborar una simulación de una red núcleo MPLS para servicio *Triple Play* para la provincia del Azuay utilizando una herramienta de simulación que permita una configuración de la red para evaluar su comportamiento.

Primero se realiza una revisión teórica del protocolo MPLS y de cada una de sus características, además de fundamentar teóricamente el servicio *Triple Play* mediante el análisis de los servicios de Internet, voz y televisión.

Después, mediante una investigación de los *softwares* de simulación de redes existentes se selecciona aquel con mayores prestaciones y que mejor se acople a los objetivos del presente proyecto. Se calcula el ancho de banda necesario para cada uno de los servicios que integran *Triple Play* mediante el análisis de los códecs de audio y video. Posteriormente se realiza el diseño de la red núcleo mediante un estudio estadístico en el cual se proyecta el número de posibles suscriptores de *Triple Play* en la provincia del Azuay.

Basándose en el diseño se implementa la topología de red en el *software* de simulación de redes seleccionado, OPNET, configurando el protocolo MPLS, la diferenciación de servicios y el mecanismo de gestión de colas. Además, se utiliza el *software* de programación MATLAB para la generación de tráfico mediante una interfaz amigable con el usuario.

Finalmente, se analiza la disponibilidad y alcance de la red mediante varias pruebas en el *software* de simulación. También se sugiere nuevos diseños de red ante la posible variación en la demanda de los servicios.

## PALABRAS CLAVES

MPLS, DiffServ, Colas, LER, LSR, LSP, núcleo, *Triple Play*, Internet, VoIP, IPTV, Códec, OPNET, MATLAB, tráfico.

---

## ABSTRACT

The primary objective of this thesis project is to elaborate a simulation of a MPLS *backbone* network for the *Triple Play* service in the province of Azuay, Ecuador. This is done by using simulation tools capable of configuring the network for evaluating its behavior.

First a theoretical review of the MPLS protocol and of each of its characteristics is conducted in addition to theoretically substantiate the service of *Triple Play* through the analysis of the services it provides which are Internet, voice and television.

Later, through researching existing network simulation *softwares* out in the market the one with most futures and which better fits to the objectives of the present project is selected. From this *software* the band width necessary for each one of the services that integrate *Triple Play* are calculated through an analysis of the visual and audio codecs. Next a central net design is created based on the on a statistical study which projects a possible number of subscribers of *Triple Play* in the province of Azuay, Ecuador.

Based on mentioned design the net's topology is implemented into the *software* simulation of selected networks, OPNET, configurations of the MPLS protocol, the differences of service and queuing mechanisms. Also, the programming *software*, MATLAB, is used to generate traffic through a friendly and easy to use interface.

Finally, the availability and extent of the network are analyzed, through various *software* simulation tests. Also, new network designs are suggested for a possible change in the demand of the services in the future.

## KEYWORDS

MPLS, DiffServ, Queuing, LER, LSR, LSP, *backbone*, *Triple Play*, Internet, VoIP, IPTV, Códec, OPNET, MATLAB, traffic.

## INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	23
DEDICATORIA.....	24
AGRADECIMIENTOS .....	25
AGRADECIMIENTOS.....	26
<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>27</b>
INTRODUCCIÓN.....	27
<b>1.1 Introducción .....</b>	<b>28</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>30</b>
<b>1.2.1 Objetivo General .....</b>	<b>30</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>30</b>
<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>31</b>
ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA MPLS Y SERVICIOS <i>TRIPLE PLAY</i> .....	31
<b>2.1 Conceptos generales de MPLS .....</b>	<b>32</b>
<b>2.1.1 Antecedentes .....</b>	<b>32</b>
<b>2.1.2 Concepto de MPLS (Multiprotocol Label <i>Switching</i>).....</b>	<b>33</b>
<b>2.1.3 Ventajas de MPLS.....</b>	<b>34</b>
<b>2.1.4 Arquitectura de MPLS .....</b>	<b>36</b>
2.1.4.1 Etiqueta.....	36
2.1.4.1.a Cabecera MPLS.....	36
2.1.4.2 Label <i>Switch Router</i> (LSR) .....	37
2.1.4.3 Label <i>Switched Path</i> (LSP) .....	38
2.1.4.4 Forwarding Equivalence Class (FEC) .....	39
2.1.4.5 Label Forwarding Instance Base (LFIB) .....	39
<b>2.1.5 Componentes lógicos de MPLS .....</b>	<b>40</b>
2.1.5.1 Plano de control .....	40
2.1.5.2 Plano de datos.....	40



<b>2.1.6 Funcionamiento de MPLS</b>	40
<b>2.1.7 Protocolos de Distribución de Etiquetas</b>	43
2.1.7.1 Tag Distribution Protocol (TDP)	45
2.1.7.2 Label Distribution Protocol (LDP)	45
2.1.7.3 Constraint-based routing LDP (CR-LDP)	45
2.1.7.4 Border Gateway Protocol (BGP)	46
2.1.7.5 Resource Reservation Protocol (RSVP)	47
<b>2.1.8 Modelo de Servicios Diferenciales (Diff-Serv)</b>	47
<b>2.1.9 Modelo de Servicios Integrales (Int-Serv)</b>	50
<b>2.1.10 Mecanismos de gestión de colas</b>	51
2.1.10.1 FIFO (First in, First out)	51
2.1.10.2 PQ (Priority Queueing)	52
2.1.10.3 FQ (Fair Queueing)	52
2.1.10.4 WFQ (Weighted Fair Queueing)	52
2.1.10.5 WRR (Weighted Round-Robin)	53
2.1.10.6 DWRR (Deficit Weighted Round Robin)	53
<b>2.2 Redes de nueva generación y servicio integrado <i>Triple Play</i></b>	54
<b>2.2.1 Redes de Nueva Generación y Convergencia de Servicios</b>	54
2.2.1.1 Redes de Nueva Generación (NGN)	54
2.2.1.2 Tecnología de las Redes de Nueva Generación (NGN)	54
2.2.1.3 Red Multiservicios	55
<b>2.2.2 Sistema <i>Triple Play</i></b>	56
2.2.2.1 Servicios <i>Triple Play</i>	56
2.2.2.2 Arquitectura para el servicio integrado <i>Triple Play</i>	57
2.2.2.3 Estructura para el servicio integrado <i>Triple Play</i>	58
2.2.2.4 Servicios que integran <i>Triple Play</i>	59
2.2.2.4.a Servicio de Voz sobre IP (VoIP)	59
2.2.2.4.b Servicio de Televisión sobre IP (IPTV)	62
2.2.2.4.c Servicio de Internet	65
2.2.2.5 Requerimientos para el servicio integrado <i>Triple Play</i>	66
2.2.2.6 QoS para el servicio integrado <i>Triple Play</i>	67
2.2.2.7 Ventajas y Desventajas del Servicio <i>Triple Play</i>	68



<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>70</b>
<b>3.1 Análisis y selección del <i>software</i> de simulación .....</b>	<b>71</b>
<b>3.1.1 Criterios analizados para la elección del <i>software</i> de simulación .....</b>	<b>71</b>
<b>3.1.2 Parámetros analizados para la elección del <i>software</i> de simulación .....</b>	<b>73</b>
3.1.2.1 Investigación.....	73
3.1.2.2 Licenciamiento.....	73
3.1.2.3 Nivel de Aprendizaje.....	74
3.1.2.4 Plataforma Gráfica.....	74
3.1.2.5 Sistemas Operativos Soportados .....	75
3.1.2.6 Redes y Protocolos.....	75
3.1.2.7 Análisis Resultados .....	76
3.1.2.8 Generación de Tráfico .....	76
<b>3.1.3 Análisis de <i>Softwares</i> de simulación .....</b>	<b>77</b>
3.1.3.1 <i>Software</i> NS2.....	77
3.1.3.2 <i>Software</i> NS3.....	79
3.1.3.3 <i>Software</i> GNS3.....	80
3.1.3.4 <i>Software</i> OMNET++ .....	81
3.1.3.5 <i>Software</i> OPNET MODELER.....	82
<b>3.2 Identificación de requerimientos para el servicio integrado <i>Triple Play</i> .....</b>	<b>87</b>
<b>3.2.1 Requerimientos en VoIP.....</b>	<b>87</b>
3.2.1.1 RTP Protocolo de Transporte en Tiempo Real.....	89
3.2.1.2 RTCP Protocolo de Control de RTP .....	90
3.2.1.3 Ancho de banda para VoIP.....	90
3.2.1.4 Análisis de parámetros para VoIP .....	91
3.2.1.4.a Velocidad de <i>bits</i> del códec .....	91
3.2.1.4.b Parámetros para el cálculo de ancho de banda para los códecs analizados.....	91
3.2.1.4.c Cálculo de ancho de banda para los códecs analizados.....	93
<b>3.2.2 Requerimientos en IPTV.....</b>	<b>98</b>
3.2.2.1 Características IPTV .....	98
3.2.2.2 Características para determinar el ancho de banda para IPTV .....	99
3.2.2.3 Códecs de Audio y Vídeo .....	99
<b>3.2.3 Requerimiento de Internet .....</b>	<b>102</b>
3.2.3.1 Análisis de los parámetros.....	103

<b>3.3 Definición de parámetros iniciales</b>	104
<b>3.3.1 Consideraciones iniciales para el diseño</b>	104
<b>3.3.2 Introducción</b>	106
<b>3.3.3 Mercado de clientes y servicios</b>	107
3.3.3.1 Población actual de la provincia del Azuay	107
3.3.3.2 Proyección del crecimiento poblacional para la provincia del Azuay hasta el año 2030	108
<b>3.3.4 Mercado de clientes y servicios</b>	109
3.3.4.1 Proyección de usuarios del servicio de Internet	109
3.3.4.1.a Demanda inicial del servicio de Internet	110
3.3.4.1.b Cálculo del ancho de banda inicial para el servicio de Internet	111
3.3.4.1.c Proyección del crecimiento de usuarios y ancho de banda del servicio de Internet para el año 2020	113
3.3.4.2 Proyección de usuarios del servicio de telefonía	114
3.3.4.2.a Demanda inicial del servicio de telefonía	114
3.3.4.2.b Cálculo del ancho de banda inicial para el servicio de telefonía	115
3.3.4.2.c Proyección del crecimiento de usuarios y ancho de banda del servicio de telefonía para el año 2020	115
3.3.4.3 Proyección de usuarios del servicio de televisión	116
3.3.4.3.a Demanda inicial del servicio de televisión	117
3.3.4.3.b Cálculo del ancho de banda inicial para el servicio de televisión	118
3.3.4.3.c Proyección del crecimiento de usuarios y ancho de banda del servicio de televisión para el año 2020	120
3.3.4.4 Dimensionamiento para el servicio integrado <i>Triple Play</i>	121
<b>3.3.5 Selección de equipos</b>	121
3.3.5.1 Equipos LSR	121
3.3.5.1 Equipos LER	122
3.3.5.3 Enlaces	123
<b>3.3.6 Diseño de la red</b>	124
<b>3.3.7 Gráfico del diseño de la red</b>	127
<b>CAPITULO 4</b>	128



IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA RED NÚCLEO .....	128
<b>4.1 Herramienta de simulación OPNET .....</b>	<b>129</b>
<b>4.1.1 Creación de un nuevo proyecto en la herramienta de simulación OPNET..</b>	<b>129</b>
<b>4.1.2 Generación de tráfico en OPNET .....</b>	<b>129</b>
4.1.2.1 Tráfico explícito .....	130
4.1.2.2 Tráfico de fondo ( <i>Background</i> ) .....	130
<b>4.1.3 Equipos utilizados en OPNET para la creación de la red .....</b>	<b>132</b>
<b>4.2 Construcción de la red en OPNET .....</b>	<b>137</b>
<b>4.3 Configuración de la red en OPNET .....</b>	<b>141</b>
<b>4.3.1 Generación de diferentes tipos de tráfico y sus respectivas prioridades     (Priorización de tráfico).....</b>	<b>141</b>
<b>4.3.2 Configuración de MPLS .....</b>	<b>143</b>
<b>4.3.3 Configuración LSPs .....</b>	<b>145</b>
<b>4.4 Elección del mejor mecanismo de gestión de colas y mejor protocolo .....</b>	<b>151</b>
<b>4.4.1 Análisis y comparación de resultados entre protocolos IP, MPLS y MPLS-TE     para cada uno de los servicios <i>Triple Play</i> .....</b>	<b>151</b>
4.3.1.1 Servicio de Internet.....	155
4.3.1.2 Servicio de Telefonía .....	156
4.3.1.3 Servicio de Televisión .....	157
<b>4.4.2 Análisis y comparación de mecanismos de gestión de colas .....</b>	<b>159</b>
<b>4.5 Análisis de los resultados.....</b>	<b>161</b>
<b>4.5.1 Escenario base totalmente funcional .....</b>	<b>161</b>
<b>4.5.2 Tráfico a lo largo del día en escenario base.....</b>	<b>162</b>
<b>4.5.3 Comportamiento de la red base cuando existe fallo de enlaces .....</b>	<b>170</b>
<b>4.5.4 Comportamiento de la red base cuando existe fallo en un LSR .....</b>	<b>176</b>
<b>4.5.5 Comportamiento de la red base cuando existe fallo en dos LSRs .....</b>	<b>184</b>





---

<b>4.5.6 Comportamiento de la red base cuando existe fallo en tres LSRs .....</b>	<b>194</b>
<b>4.5.7 Comportamiento de la red base: plan básico vs plan medio.....</b>	<b>204</b>
<b>4.5.8 Comportamiento de la red base: plan medio vs plan alto.....</b>	<b>213</b>
 <b>CAPITULO 5.....</b>	 <b>221</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>221</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>226</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>229</b>
<b>ANEXO A. DISEÑO DE LA RED NÚCLEO .....</b>	<b>230</b>
<b>ANEXO B: Manual de usuario.....</b>	<b>231</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 2.1:</b> Antecedentes de la tecnología MPLS.....	32
<b>Figura 2.2:</b> MPLS, capa2 y capa3.....	33
<b>Figura 2.3:</b> MPLS, capa 2.5 del modelo OSI .....	34
<b>Figura 2.4:</b> Cabecera MPLS .....	36
<b>Figura 2.5:</b> Pila de etiquetas .....	37
<b>Figura 2.6:</b> Componentes físicos de MPLS .....	39
<b>Figura 2.7:</b> Plano de control y plano de datos en un LSR y un LER .....	41
<b>Figura 2.8:</b> Funcionamiento de una red MPLS .....	43
<b>Figura 2.9:</b> Campo Servicio Diferencial (DS) .....	48
<b>Figura 2.10:</b> Convergencia de protocolos en las Redes de Nueva Generación (NGN) ..	55
<b>Figura 2.11:</b> Convergencia de servicios en las Redes de nueva Generación (NGN) .....	55
<b>Figura 2.12:</b> Análisis de la tecnología <i>Triple Play</i> .....	56
<b>Figura 2.13:</b> Integración de Servicios en la tecnología <i>Triple Play</i> .....	56
<b>Figura 2.14:</b> Infraestructura para diferentes servicios en las redes de telecomunicaciones actuales.....	57
<b>Figura 2.15:</b> Diagrama de bloques de la arquitectura para el servicio integrado <i>Triple Play</i> .....	58
<b>Figura 2.16:</b> Transporte del servicio de voz en redes IP para el servicio <i>Triple Play</i> .....	60
<b>Figura 2.17:</b> Retardos para el servicio VoIP .....	61
<b>Figura 2.18:</b> Esquema IPTV para el servicio integrado <i>Triple Play</i> .....	64
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 3.1:</b> Fragmento de código en NS2.....	78
<b>Figura 3.2:</b> Escenario simulación NS2.....	79
<b>Figura 3.3:</b> Fragmento de código en NS3.....	80
<b>Figura 3.4:</b> Escenario simulación NS3.....	80
<b>Figura 3.5:</b> Interfaz Gráfica GNS3 .....	81
<b>Figura 3.6:</b> Interfaz Gráfica OMNET++ .....	83
<b>Figura 3.7:</b> OPNET MODELER.....	84
<b>Figura 3.8:</b> Interfaz OPNET MODELER .....	85
<b>Figura 3.9:</b> Empaquetamiento flujo de voz .....	89
<b>Figura 3.10:</b> Empaquetado Flujos con códecs MPEG .....	100
<b>Figura 3.11:</b> Estructura de una red jerárquica .....	106
<b>Figura 3.12:</b> Población por cantones. INEC 2010.....	108
<b>Figura 3.13:</b> Planes del servicio de Internet. ETAPA EP .....	112
<b>Figura 3.14:</b> Cisco Catalyst 6506.....	122
<b>Figura 3.15:</b> Router Cisco. Serie 7600.....	123

<b>Figura 3.16:</b> Tipo de vivienda por cantón. Provincia del Azuay .....	125
<b>Figura 3.17:</b> Diseño de la red núcleo con MPLS para servicio <i>Triple Play</i> en la provincia del Azuay. Revisar Anexo A. ....	127
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 4.1:</b> Proyecto nuevo OPNET. Tamaño <i>World</i> .....	130
<b>Figura 4.2:</b> Generación de tráfico explícito en OPNET .....	131
<b>Figura 4.3:</b> Generación de tráfico de fondo en OPNET .....	132
<b>Figura 4.4:</b> Importación de tráfico en OPNET a través de archivos externos .tr1 o .tr2 .....	133
<b>Figura 4.5:</b> Bloque “Configuración Aplicación” en OPNET .....	135
<b>Figura 4.6:</b> Bloque “Configuración Perfil” en OPNET.....	136
<b>Figura 4.7:</b> Bloque “Configuración QoS” en OPNET.....	136
<b>Figura 4.8:</b> Bloque “Configuración MPLS” en OPNET .....	137
<b>Figura 4.9:</b> Bloque “Configuración Fallos en enlaces y nodos” en OPNET .....	137
<b>Figura 4.10:</b> Herramienta MPLS en OPNET .....	137
<b>Figura 4.11:</b> Equipos que integran la red núcleo .....	138
<b>Figura 4.12:</b> Servidores de Internet, VoIP, IPTV.....	139
<b>Figura 4.13:</b> <i>Router</i> de distribución perteneciente a cada LER de salida .....	140
<b>Figura 4.15:</b> Lógica para nombrar los enlaces de la red núcleo .....	141
<b>Figura 4.18:</b> Diferenciación de Servicio para IPTV .....	142
<b>Figura 4.19:</b> Configuración: direccionamiento IP, protocolo OSPF.....	143
<b>Figura 4.20:</b> Configuración MPLS: asignación de DSCP para diferenciación de servicios.....	144
<b>Figura 4.21:</b> Configuración MPLS: configuración FEC para cada tipo de servicio de <i>Triple Play</i> .....	145
<b>Figura 4.22:</b> Configuración MPLS: configuración tronco tráfico para diferentes FEC en la red .....	145
<b>Figura 4.23:</b> Configuración LSP para cada servicio de <i>Triple Play</i> .....	146
<b>Figura 4.24:</b> Lógica de cada ruta LSP en la red núcleo .....	147
<b>Figura 4.25:</b> Configuración servicio VoIP con tráfico explícito .....	153
<b>Figura 4.26:</b> Configuración canal SD para el servicio IPTV con tráfico explícito .....	154
<b>Figura 4.27:</b> Configuración canal HD para el servicio IPTV con tráfico explícito .....	154
<b>Figura 4.28:</b> Configuración servicio Internet con tráfico explícito.....	154
<b>Figura 4.29:</b> Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro Object response time para HTTP en segundos. Servicio de Internet .....	155
<b>Figura 4.30:</b> Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro Respuesta Tiempo Página HTTP en segundos. Servicio de Internet.....	156
<b>Figura 4.31:</b> Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro Retardo de paquetes. Servicio VoIP .....	157
<b>Figura 4.32:</b> Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro Packet end-to-end delay. Servicio IPTV .....	158
<b>Figura 4.33:</b> Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro Retardo de	

Paquetes. Servicio IPTV .....	158
<b>Figura 4.34:</b> Comparación entre diferentes algoritmos de colas. Rojo-cola DWRR,.....	159
Azul cola PQ, Verde cola WFQ. Parámetro analizado Retardo End-End de paquetes para el servicio IPTV .....	159
<b>Figura 4.35:</b> Comparación entre diferentes algoritmos de colas. Rojo-cola DWRR, Verde cola PQ, Azul cola WFQ. Parámetro analizado Retardo de paquetes para el servicio VoIP .....	160
Figura 4.36: <i>Throughput</i> en cada uno de los enlaces de salida hacia la capa de distribución. Zona 4 está representada por una sola curva, ya que tráfico en todos sus LERs equitativo.....	162
<b>Figura 4.37:</b> Configuración MATLAB tráfico a lo largo de un día en el escenario base	164
<b>Figura 4.38:</b> Escenario base: Comparación de la Utilización del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR4-LERout1 .....	165
<b>Figura 4.39:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR4-LERout1 .....	165
<b>Figura 4.40:</b> Escenario base: Comparación de la Utilización del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR4-LERout2 .....	166
<b>Figura 4.41:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR4-LERout2 .....	167
<b>Figura 4.42:</b> Escenario base: Comparación de la Utilización del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR2-LERout3 .....	168
<b>Figura 4.43:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR2-LERout3 .....	168
<b>Figura 4.44:</b> Escenario base: Comparación de la Utilización del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR1-LERout8 .....	169
<b>Figura 4.45:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR1-LERout8 .....	170
<b>Figura 4.46:</b> Configuración falla de enlaces de entrada para cada servicio de <i>Triple Play</i> en el escenario base.....	171
<b>Figura 4.47:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> de entrada cuando existe falla en el enlace de entrada LER_in2 correspondiente al servicio VoIP .....	172
<b>Figura 4.48:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> de salida cuando existe falla en el enlace de entrada LER_in2 correspondiente al servicio VoIP .....	173
<b>Figura 4.49:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> de entrada cuando existe falla en el enlace de entrada LER_in3 correspondiente al servicio IPTV.....	174
<b>Figura 4.50:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> de salida cuando existe falla en el enlace de entrada LER_in3 correspondiente al servicio IPTV .....	175
<b>Figura 4.51:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> de entrada cuando existe falla en el enlace de entrada LER_in1 correspondiente al servicio Internet .....	176
<b>Figura 4.52:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> de salida cuando existe falla en el enlace de entrada LER_in1 correspondiente al servicio Internet .....	177
<b>Figura 4.53:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de cada uno de los LER_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR1 se encuentra en estado inactivo.....	178

<b>Figura 4.54:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR1 se encuentran en estado inactivo .....	179
<b>Figura 4.55:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de cada uno de los LER_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR2 se encuentra en estado inactivo.....	180
<b>Figura 4.56:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR2 se encuentran en estado inactivo .....	180
<b>Figura 4.57:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de cada uno de los LER_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR3 se encuentra en estado inactivo.....	181
<b>Figura 4.58:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR3 se encuentran en estado inactivo .....	182
<b>Figura 4.59:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de cada uno de los LER_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR4 se encuentra en estado inactivo.....	183
<b>Figura 4.60:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR4 se encuentran en estado inactivo .....	184
<b>Figura 4.61:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los LER_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1 y LSR2 se encuentran en estado inactivo .....	185
<b>Figura 4.62:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los cinco LER_out de la zona 4 cuando LSR1 y LSR2 se encuentran en estado inactivo ..	186
<b>Figura 4.63:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR1 y LSR2 se encuentran en estado inactivo .....	187
<b>Figura 4.64:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los LER_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1 y LSR3 se encuentran en estado inactivo .....	187
<b>Figura 4.65:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los cinco LER_out de la zona 4 cuando LSR1 y LSR3 se encuentran en estado inactivo ..	188
<b>Figura 4.66:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR1 y LSR3 se encuentran en estado inactivo .....	189
<b>Figura 4.67:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los LER_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo .....	190
<b>Figura 4.68:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los cinco LER_out de la zona 4 cuando LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo ..	190
<b>Figura 4.69:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo .....	191
<b>Figura 4.70:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los LER_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo .....	192
<b>Figura 4.71:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los cinco LER_out de la zona 4 cuando LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo ..	193

<b>Figura 4.72:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo .....	193
<b>Figura 4.73:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los LER_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1, LSR2 y LSR3 se encuentran en estado inactivo.....	195
<b>Figura 4.74:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los cinco LER_out de la zona 4 cuando LSR1, LSR2 y LSR3 se encuentran en estado inactivo .....	195
<b>Figura 4.75:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR1, LSR2 y LSR3 se encuentran en estado inactivo.....	196
<b>Figura 4.76:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los LER_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.....	197
<b>Figura 4.77:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los cinco LER_out de la zona 4 cuando LSR1, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo .....	198
<b>Figura 4.78:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR1, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.....	199
<b>Figura 4.79:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los LER_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1, LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.....	200
<b>Figura 4.80:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los cinco LER_out de la zona 4 cuando LSR1, LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo .....	201
<b>Figura 4.81:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR1, LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.....	201
<b>Figura 4.82:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los LER_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR2, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.....	202
<b>Figura 4.83:</b> <i>Throughput</i> de salida en uno de los cinco <i>routers</i> de distribución de los cinco LER_out de la zona 4 cuando LSR2, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo .....	203
<b>Figura 4.84:</b> Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER_out cuando LSR2, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.....	204
<b>Figura 4.85:</b> Ancho de banda total demandado por las distintas zonas de la provincia del Azuay utilizando el plan básico.....	205
<b>Figura 4.86:</b> <i>Throughput</i> del enlace LSR4-LER_out1. Curva de color azul, tráfico correspondiente a un plan medio. Curva de color rojo, tráfico correspondiente a un plan bajo.....	206
<b>Figura 4.87:</b> Comparación del porcentaje de utilización del enlace de salida de LER1 con tráfico correspondiente a un plan medio vs tráfico correspondiente a un plan bajo	206
<b>Figura 4.88:</b> <i>Throughput</i> del enlace LSR4-LER_out2. Curva de color azul, tráfico correspondiente a un plan medio. Curva de color rojo, tráfico correspondiente a un plan bajo.....	207



<b>Figura 4.89:</b> Comparación del porcentaje de utilización del enlace de salida de LER2 con tráfico correspondiente a un plan medio vs tráfico correspondiente a un plan bajo 208	
<b>Figura 4.90:</b> <i>Throughput</i> del enlace LSR2-LER_out3. Curva de color azul, tráfico correspondiente a un plan medio. Curva de color rojo, tráfico correspondiente a un plan bajo.....	209
<b>Figura 4.91:</b> Comparación del porcentaje de utilización del enlace de salida de LER3 con tráfico correspondiente a un plan medio vs tráfico correspondiente a un plan bajo 209	
<b>Figura 4.92:</b> <i>Throughput</i> del enlace LSR2-LER_out4. Curva de color azul, tráfico correspondiente a un plan medio. Curva de color rojo, tráfico correspondiente a un plan bajo.....	210
<b>Figura 4.93:</b> Comparación del porcentaje de utilización del enlace de salida de LER4 con tráfico correspondiente a un plan medio vs tráfico correspondiente a un plan bajo 211	
<b>Figura 4.94:</b> Escenario Solución: Diseño de red solución en el caso del escenario con plan básico .....	212
<b>Figura 4.95:</b> Tráfico calculado para la red núcleo con plan alto.....	213
<b>Figura 4.96:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR2-LER_out4 .....	214
<b>Figura 4.97:</b> Escenario base: Comparación de Porcentaje Utilización entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR2-LER_out4.....	215
<b>Figura 4.98:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR3-LER_out5 .....	216
<b>Figura 4.99:</b> Escenario base: Comparación del Porcentaje de Utilización entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR3-LER_out5 .....	217
<b>Figura 4.100:</b> Escenario base: Comparación del <i>Throughput</i> entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR1-LER_out8 .....	218
<b>Figura 4.101:</b> Escenario base: Comparación del Porcentaje de Utilización entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR1-LER_out8 .....	219
<b>Figura 4.102:</b> Escenario Solución: Diseño de red solución en el caso del escenario con plan alto para la Zona 4 .....	220
<b>ANEXOS.....</b>	<b>229</b>
<b>Figura B.1:</b> Interfaz Gráfica MATLAB configuración Zonas .....	231
<b>Figura B.2:</b> Interfaz Gráfica MATLAB Interfaz Servicio <i>Triple Play</i> .....	231
<b>Figura B.3:</b> Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicios <i>Triple Play</i> .....	232
<b>Figura B.4:</b> Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicio Internet.....	232
<b>Figura B.5:</b> Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicio VoIP .....	232
<b>Figura B.6:</b> Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicio VoIP .....	232
<b>Figura B.7:</b> Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicio IPTV .....	233
<b>Figura B.8:</b> Interfaz Gráfica MATLAB configuración suscriptores según el año .....	233
<b>Figura B.9:</b> Interfaz Gráfica MATLAB configuración tráfico a lo largo del día.....	233
<b>Figura B.10:</b> OPNET importación tráfico generado en MATLAB .....	234
<b>Figura B.11:</b> OPNET selección de los archivos generados en MATLAB para importación tráfico.....	234



---

<b>Figura B.12:</b> Selección de las estadísticas a analizar en la simulación .....	235
<b>Figura B.13:</b> Selección de las estadísticas a analizar en la simulación .....	235
<b>Figura B.15:</b> Configuración de tiempo de simulación para la red núcleo.....	235
<b>Figura B.16:</b> Análisis de los resultados mediante herramienta View Results en OPNET .....	235
<b>Figura B.17:</b> Análisis de los resultados mediante herramienta View Results en OPNET .....	236



## INDICE DE TABLAS

<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 2.1:</b> Assured Forwarding. Clases y prioridades.....	49
<b>Tabla 2.2:</b> Características de servicios de voz, video y datos en el servicio integrado <i>Triple Play</i> .....	57
<b>Tabla 2.3:</b> Tabla de códecs para el servicio de VoIP .....	63
<b>Tabla 2.4:</b> Parámetros para servicio IPTV .....	64
<b>Tabla 2.5:</b> Requerimientos de ancho de banda para servicio <i>Triple Play</i> para diferentes planes .....	67
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 3.1:</b> Comparación <i>software</i> de simulación .....	86
<b>Tabla 3.2:</b> Características Códecs Voz .....	88
<b>Tabla 3.3:</b> Códecs para VoIP .....	91
<b>Tabla 3.4:</b> Códecs de voz seleccionados para el servicio de VoIP .....	97
<b>Tabla 3.5:</b> Códecs para IPTV .....	100
<b>Tabla 3.6:</b> Características de los canales para el servicio de IPTV.....	102
<b>Tabla 3.7:</b> Ancho de banda para servicio de datos .....	104
<b>Tabla 3.8:</b> Número de habitantes y de hogares en la provincia del Azuay. INEC 2010 [48].....	107
<b>Tabla 3.9:</b> Proyección del crecimiento poblacional de la provincia del Azuay hasta el año 2020 y 2030 .....	108
<b>Tabla 3.10:</b> Proyección del crecimiento de los hogares en la provincia del Azuay hasta el año 2020 y 2030 .....	109
<b>Tabla 3.11:</b> Habitantes de la provincia del Azuay que cuentan con el servicio de Internet. Arcotel. Septiembre 2015 . .....	110
<b>Tabla 3.12:</b> Suscriptores del servicio de Internet en la provincia del Azuay. Año 2016.....	111
<b>Tabla 3.13:</b> Ancho de banda requerido para brindar el servicio de Internet a la provincia del Azuay. Año 2016.....	113
<b>Tabla 3.14:</b> Ancho de banda requerido para brindar el servicio de Internet a la provincia del Azuay. Año 2020.....	114
<b>Tabla 3.15:</b> Habitantes de la provincia del Azuay que cuentan con el servicio de telefonía fija. Arcotel. Noviembre 2015.....	114
<b>Tabla 3.16:</b> Ancho de banda requerido para brindar los servicios de Internet y telefonía a la provincia del Azuay. Año 2016.....	115
<b>Tabla 3.17:</b> Ancho de banda requerido para brindar los servicios de Internet y telefonía a la provincia del Azuay. Año 2020.....	116
<b>Tabla 3.18:</b> Suscriptores de la provincia del Azuay que cuentan con el servicio de televisión pagada. Arcotel. Septiembre 2015 .....	117
<b>Tabla 3.19:</b> Demanda inicial del servicio de televisión sobre IP. Año 2016. ....	118
<b>Tabla 3.20:</b> Planes diferenciados. Servicio IPTV .....	118



<b>Tabla 3.21:</b> Población económicamente activa. Azuay .....	119
<b>Tabla 3.22:</b> Ancho de banda necesario para brindar el servicio de IPTV en la provincia del Azuay. Año 2016.....	119
<b>Tabla 3.23:</b> Ancho de banda necesario para brindar el servicio de IPTV en la provincia del Azuay. Año 2020.....	121
<b>Tabla 3.24:</b> Portadores ópticos. Tecnología SONET. ....	124
<b>Tabla 3.25:</b> Sectores de la provincia del Azuay para colocación de LERs de salida ....	126
<b>Tabla 3.26:</b> Usuarios de Internet, IPTV y VoIP por sectores en donde se colocará LERs de salida. Año 2020 .....	126
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>128</b>
<b>Tabla 4.1:</b> Enlaces utilizados en la red núcleo .....	140
<b>Tabla 4.2.</b> Rutas que siguen las LSPs tanto principal (izquierda), como de <i>backup</i> (derecha) en cada una de las zonas de la provincia del Azuay .....	150
<b>Tabla 4.3:</b> Enlaces de la red con las LSPs, tanto principal como de <i>backup</i> , que pasan por cada uno de ellos .....	151
<b>Tabla 4.4:</b> Enlaces analizados para el caso de tráfico a lo largo del día en escenario base.....	163
<b>Tabla 4.5:</b> Porcentaje utilización de los suscriptores del servicio <i>Triple Play</i> .....	164

## CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR



Universidad de Cuenca  
Clausula de derechos de autor

Yo, Angélica María Cabrera Idrovo, autor de la tesis "Simulación de una red núcleo con MPLS para servicio Triple Play para un operador de telecomunicaciones en la provincia del Azuay", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora

Cuenca, 05 de Abril de 2016

Angélica Cabrera I.

Angélica María Cabrera Idrovo

C.I: 010485241-3

## CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR



Universidad de Cuenca  
Cláusula de derechos de autor

Yo, David Esteban Farfán Guillén, autor de la tesis "Simulación de una red núcleo con MPLS para servicio Triple Play para un operador de telecomunicaciones en la provincia del Azuay", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, 05 de Abril de 2016



David Esteban Farfán Guillén

C.I: 010507137-7

## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca  
Clausula de propiedad intelectual

Yo, Angélica María Cabrera Idrovo, autor de la tesis "Simulación de una red núcleo con MPLS para servicio Triple Play para un operador de telecomunicaciones en la provincia del Azuay", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 05 de Abril de 2016

Angélica Cabrera I.

Angélica María Cabrera Idrovo

C.I: 010485241-3

## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca  
Clausula de propiedad intelectual

Yo, David Esteban Farfán Guillén, autor de la tesis "Simulación de una red núcleo con MPLS para servicio Triple Play para un operador de telecomunicaciones en la provincia del Azuay", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 05 de Abril de 2016



David Esteban Farfán Guillén

C.I: 010507137-7

## DEDICATORIA

A papá, por ser mi ejemplo, mi compañero, mi mejor amigo y sobre todo por jamás dejarme sola,  
seguiremos juntos hasta el final.

A mamá por haber sido un ejemplo de fortaleza y por haber creído en mí.

A mi hermano y amigo John por haber caminado juntos los momentos más difíciles de nuestra  
vida.

A mi hermanito pequeño, José Gabriel, por haber llenado mi vida de abrazitos, besitos y  
alegrías.

A David por no haber soltado mi mano.

A Mariuchita, me faltaría la vida para agradecerte tu increíble valentía, inteligencia y gran  
corazón. Seguiremos creciendo.

A mis grandes amigos, Pipe y Esteban por la hermandad que nos une.

A todos quienes fueron mis compañeros, que con su amistad y cariño hicieron de la universidad  
la mejor etapa de mi vida

A la gran energía que nos hace despertar para luchar por nuestros sueños.

Angélica

## DEDICATORIA

A papá por enseñarme el valor de la vida y de la lucha que hay tras ella,

A mamá fuente inagotable de motivación y rebeldía,

A mi hermana ejemplo y compañera de vivencias,

Al pequeño David por todas las veces que caímos, por todas las veces que sonreímos, vivir es  
eso...

A Angélica amiga y compañera,

A todos aquellos con quienes nos hemos cruzado en el camino de la vida,

A la vida, a las emociones que nos hacen fuertes, a esa cualidad innata que nos hace buscar la  
libertad.

David



## AGRADECIMIENTOS

A mis padres.

A la Ing. Sofía Arévalo por su amistad y valioso aporte para la culminación de esta tesis.

A todos quienes fueron mis profesores y a la Universidad de Cuenca.

A todos quienes de una u otra manera colaboraron en este proyecto y durante mi vida universitaria.

Angélica

---

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su compañerismo y apoyo,  
A la Ing Sofía Arévalo por su entrega y amistad en el desarrollo de este proyecto,  
A mi querida Universidad de Cuenca, a sus profesores, a sus aulas,  
A mis compañeros y amigos, cada recuerdo será invaluable,  
A lo que nos motiva a caminar cada día como si fuera el último.

David

# **CAPITULO 1**

---

## INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Introducción

La creciente demanda de las redes de servicios de telecomunicaciones (voz, video, datos) sumado a la libre competencia entre las diferentes empresas ofertantes han promovido un continuo desarrollo en las telecomunicaciones. Históricamente las redes de servicios han venido desplegándose de tal manera que cada una de estas tiene su propia infraestructura lo que ha causado redes inflexibles, incapaces de ajustarse a los nuevos requisitos en la calidad de servicios.

En la actualidad los proveedores de servicios promueven una red de nueva generación, esta red busca la convergencia de servicios de datos, voz y vídeo en lugar de redes dedicadas a un solo servicio.

Las redes de nueva generación requieren de la implementación de un núcleo único MPLS (Multiprotocol Label *Switching*) para el transporte de todo tipo de servicios. Este presenta ventajas importantes en términos de simplificación de la infraestructura de red y por tanto de abaratamiento de su operación y mantenimiento [5].

MPLS es un mecanismo de transporte de datos. Es también conocido como la capa 2.5 del modelo OSI, ya que opera entre las capas 2 y 3 del mismo. MPLS fue diseñado para unificar el servicio de transporte de datos para las redes basadas en circuitos y las redes basadas en paquetes.

Es capaz de transportar diferentes tipos de tráfico, incluyendo tráfico de voz y de paquetes IP. Ofrece niveles de rendimiento diferenciales, priorización del tráfico, aplicaciones de voz y multimedia; todo en una sola red [2]

En la actualidad los proveedores ofrecen servicios integrados tal como es *Triple Play*, éste se define como el empaquetamiento de servicios y contenidos audiovisuales (voz, banda ancha y televisión) que son proporcionados por una misma red de servicios. [24]

MPLS agiliza el acceso de los usuarios al servicio *Triple Play* y además permite utilizar cualquier medio de transmisión ya sea par trenzado, fibra óptica, cable coaxial o radiofrecuencia, apoyando también al proveedor en el monitoreo y gestión del tráfico cursado hacia los clientes. Además, MPLS ofrece ventajas en términos de simplificación de infraestructura ya que soporta cualquier tecnología a nivel de la capa física y de enlace de datos sin necesidad de adoptar por completo una nueva infraestructura de

---

red para cada servicio. Una de las características de MPLS es la priorización del tráfico, lo que puede ser aprovechado por *Triple Play* al momento de priorizar el servicio de VoIP (Voz sobre IP). [5] [11].

MPLS es una solución escalable, independiente del protocolo de transporte. A los paquetes de datos se les asignan etiquetas ésta es una de las características más importantes del MPLS aplicado en *Triple Play* pues permite etiquetar el tráfico según el tipo de servicio, ésta técnica supone un mecanismo mucho más flexible para encaminar los paquetes a través de los diferentes enrutadores disponibles en la red. Tomando en cuenta la ingeniería de tráfico de MPLS se prevé la calidad del servicio, el balanceo de carga y la facilidad de la recuperación ante fallas en enlaces y nodos. [2]

En nuestro medio, ISPs (Proveedor de Servicio de Internet) locales y nacionales como son ETAPA EP, CNT EP, entre otros, brindan servicios de Internet a los usuarios mediante infraestructura propia. La infraestructura utilizada para ofrecer el servicio usa una red núcleo basada en MPLS, sin embargo, para brindar servicios tales como telefonía y televisión pagada se han implementado infraestructuras de red paralelas, es decir, una infraestructura para televisión y otra para telefonía.

Una alternativa para estas empresas de telecomunicaciones sería integrar dichos servicios en una misma infraestructura para de esta forma optimizar recursos. Lo conveniente sería brindar los servicios *Triple Play* mediante una sola red de acceso y a través de una sola red núcleo. Por esta razón se requiere una herramienta de *software* que permita aproximar mediante una simulación las necesidades de la red núcleo MPLS y de su crecimiento a futuro.

Mediante el proyecto de tesis planteado se busca realizar una simulación de la red núcleo MPLS para servicios *Triple Play* en la provincia del Azuay. El motivo por el cual se ha planteado este tema es por la necesidad de implementar un diseño de red dinámico que permita al administrador realizar una planificación más precisa de la misma.

Al ser un esquema dinámico éste nos va a permitir el estudio de la red ante el cambio de factores como la densidad del tráfico, ingreso de nuevos usuarios o fallo en alguno de los equipos permitiendo a su vez análisis de los nodos, redistribución de tráfico, balanceo de carga y distribución de equipos.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Elaborar una simulación de una red núcleo MPLS para servicio *Triple Play* de un operador de telecomunicaciones en la provincia del Azuay utilizando una herramienta de simulación que permita una reconfiguración de la red para evaluar su comportamiento.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar y seleccionar la herramienta de simulación más adecuada.
- Estudiar y determinar los algoritmos a utilizar para la aplicación del protocolo MPLS y los modelos de colas que van a manejar los equipos.
- Configurar y programar la simulación de la red núcleo aplicando MPLS para servicios *Triple Play*.

## **CAPITULO 2**

---

### **ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA MPLS Y SERVICIOS *TRIPLE PLAY***

## 2.1 Conceptos generales de MPLS

### 2.1.1 Antecedentes

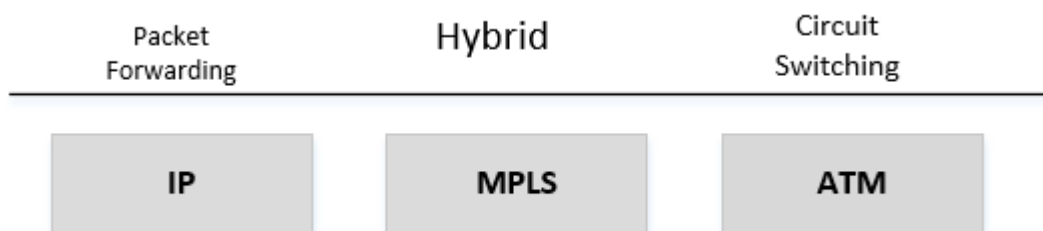
El protocolo de Internet (IP) es el primer protocolo definido y utilizado, está diseñado para ser usado en sistemas de redes interconectados de redes de comunicación de ordenadores y es capaz de transmitir paquetes no conmutados.

Según el modelo OSI, éste protocolo trabaja en la capa de red, capa 3; sin embargo, el protocolo IP es un protocolo no orientado a conexión, por tanto: no garantiza QoS (Calidad de servicio), es ineficiente en cuanto al manejo de congestión y en caso de fallo la redistribución de tráfico es lenta. Además, el encabezado IP es relativamente grande, de al menos 20 *bytes*; el ruteo se realiza en la capa de red, por tanto, es más lento que la conmutación; está diseñado para obtener el camino más corto, no considera otras métricas [1].

El protocolo ATM es una tecnología de red que permite la transferencia simultánea de voz y de datos (conmutación de circuitos), es un protocolo orientado a la conexión y por lo tanto soporta QoS; trabaja en capa 2, por lo que la conmutación es mucho más rápida. ATM transfiere datos de manera asíncrona, lo que permite una óptima utilización del ancho de banda.

Sin embargo, este protocolo es una tecnología costosa, compleja, no es ampliamente adoptada y no escala bien cuando se trata de IP, es decir, los *routers* IP desconocen la topología de la red ATM, complejas mallas de PVCs en la red ATM  $[n(n-1)/2]$ , además, desde los *routers* no se aprovecha la QoS que brinda ATM [2] [3].

De estas dos tecnologías nace una nueva idea, combinar los algoritmos usados en ATM e IP para crear una nueva y mejorada tecnología: MPLS [4].

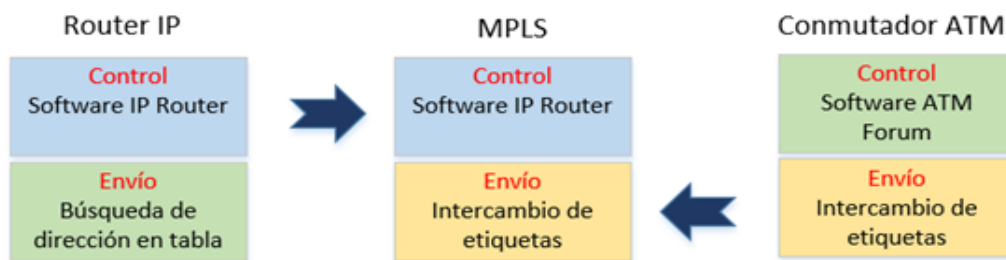


**Figura 2.1:** Antecedentes de la tecnología MPLS



Los problemas de IP y de ATM derivados de la gestión de dos redes diferentes motivaron a los fabricantes a estandarizar una tecnología que integre de forma efectiva [5]:

- La capacidad de los *routers* IP en el control IP en la capa 3.
- La eficacia de los conmutadores ATM en el envío de celdas a través del intercambio de etiquetas, en la capa 2.



**Figura 2.2:** MPLS, capa2 y capa3

MPLS es una evolución de varias tecnologías propietarias de conmutación de etiquetas, entre ellas: *Aggregate Route-Based IP Switch (ARIS)*, propiedad de IBM; *TAG switching*, propiedad de Cisco Systems; *PORS* de *Nortel Networks*; *Ipsilon IP Switching* de Nokia; *Ascend IP Navigator* de Lucent Technologies y *MPOA* de The ATM Forum. Estas técnicas se dieron a conocer como conmutación IP o conmutación multinivel, las cuales condujeron a lo que hoy en día conocemos como MPLS, según el estándar RFC 3031. La primera versión de MPLS fue lanzada en el año de 1997 [6].

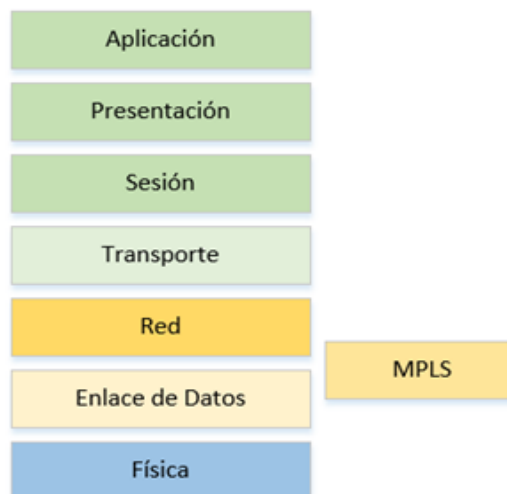
### 2.1.2 Concepto de MPLS (Multiprotocol Label Switching)

MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) es una tecnología de reenvío de paquetes que utiliza información contenida en etiquetas para tomar decisiones de envío de datos [7].

MPLS fusiona el enrutamiento inteligente y la flexibilidad de las comunicaciones punto a punto de la capa 3 con las funciones de envío y la fiabilidad y seguridad de capa 2. Es una tecnología híbrida conocida como la capa 2.5 del modelo OSI que intenta combinar las mejores técnicas para hacer llegar un paquete de un origen a un destino a través de una red de interconexión [8][9]. Figura 2.3.

Es un estándar IP de conmutación de paquetes del IETF, que trata de proporcionar algunas de las características de las redes orientadas a conexión a las redes no orientadas a conexión [10].

#### Capas del Modelo OSI



**Figura 2.3:** MPLS, capa 2.5 del modelo OSI

### 2.1.3 Ventajas de MPLS

**Ahorro de costes mediante la utilización de infraestructura unificada:** MPLS ofrece ventajas en términos de simplificación y abaratamiento de costos con respecto a infraestructura, ya que es capaz de soportar par trenzado, cable coaxial, fibra óptica o radiofrecuencia con respecto a capa 1 y cualquier tecnología en capa 2. El ahorro de costos incrementa en cuanto se usa MPLS para brindar mayor cantidad de servicios y aplicaciones usando la misma infraestructura. MPLS etiqueta paquetes de ingreso en base a su dirección de destino u otros criterios preconfigurados (QoS, dirección de origen, etc) y envía todo el tráfico a través de una infraestructura común [11] [12] [13].

**Ingeniería de Tráfico:** La ingeniería de tráfico es un criterio de diseño de red que permite que el tráfico tome automáticamente la ruta óptima según el ancho de banda disponible. La ingeniería de tráfico se puede implementar en cualquier tipo de red (IP, Frame Relay, ATM, etc), pero sólo MPLS ofrece las siguientes ventajas [14]:

- Implementa balance de carga y elección de rutas sin necesidad de cambiar las métricas del protocolo de enrutamiento (IGP) [14].
- Permite lidiar fácilmente con congestiones inesperadas en los enlaces. Debido a la naturaleza de “muchos a muchos” de los servicios MPLS, los diseñadores

de red pueden reducir el número de saltos entre puntos, lo que se traduce directamente en una mejora de los tiempos de respuesta y del rendimiento de las aplicaciones [12] [14].

- Re-enrutamiento casi inmediato y automático de paquetes ante caídas de enlaces o nodos, es decir, recuperación ante desastres. Los servicios basados en MPLS mejoran la recuperación ante desastres de diversas maneras. En primer lugar, permiten conectar los centros de datos y otros emplazamientos clave mediante múltiples conexiones redundantes a la nube MPLS y, a través de ella, a otros sitios de la red. Además, los sitios remotos pueden ser reconectados fácil y rápidamente a las localizaciones de *backup*; a diferencia de lo que ocurre con las redes ATM y Frame Relay, en las cuales se requieren circuitos virtuales de *backup* permanentes o conmutados [12] [14].

**Soporte de QoS:** Uno de los principales beneficios de MPLS reside en su capacidad de brindar soporte de QoS. QoS permite tratar de diferente manera paquetes que van al mismo destino, lo que da paso a la priorización de tráfico. Además, mediante QoS se utiliza todos los recursos de la red de manera óptima y no solo las líneas que se consideran rápidas ya que éstas en algún momento pueden llegar a saturarse [11] [12] [13].

QoS permite al administrador un mayor control sobre su red, lo que significa menores costos y mayor satisfacción del usuario final. Además, facilita una solución adecuada al constante crecimiento de tráfico en las redes mediante la administración efectiva de recursos.

En resumen, QoS otorga mayor control a los administradores sobre sus redes, mejora la interacción del usuario con el sistema y reduce costos al asignar recursos con mayor eficiencia (*bandwidth*). Mejora el control sobre la latencia para asegurar la capacidad de transmisión de voz sin interrupciones y finalmente, disminuye el porcentaje de paquetes desechados por los enrutadores: confiabilidad [15].

**BGP – Free Core:** MPLS permite la transmisión de paquetes basándose en una búsqueda de etiqueta en lugar de una búsqueda de las direcciones IP. MPLS permite una etiqueta para ser asociado con una salida del *router* en lugar de con la dirección IP de destino del paquete. La etiqueta es la información adjunta al paquete que le dice a cada *router* intermedio hacia qué *router* de borde debe ser enviada. Ya que los *routers* de núcleo no necesitan tener información sobre la dirección IP de destino, éstos ya no necesitan correr BGP [13].

**Soporte de Redes Virtuales (VPN, por sus siglas en inglés):** MPLS provee un mecanismo eficiente para el manejo de las redes privadas virtuales. Mediante el uso de VPN, el tráfico de una red privada circula por Internet de una manera transparente para el cliente al mismo tiempo que protege la información [15].

MPLS envía paquetes por los túneles privados creados por las VPN, utilizando etiquetas, las cuales poseen identificadores que aíslan a dicha VPN y la aíslan del tráfico de otras VPNs. Las VPN creadas con tecnología MPLS son más flexibles y tienen mayor capacidad de expansión en cualquier red, principalmente en IP.

## 2.1.4 Arquitectura de MPLS

### 2.1.4.1 Etiqueta

Una etiqueta es un identificador de 32 *bits* que señala una FEC (Forward Equivalence Class) determinada. Generalmente la etiqueta es asignada en función de la capa de red, pero a diferencia de IP, la cual da la dirección del *host* propietario de los datos del paquete IP; la información que contiene la etiqueta pertenece únicamente al LSR emisor y al LSR receptor para tener una conexión al siguiente salto [16].

Una etiqueta tiene sentido únicamente de un LSR (*Label Switch Router*) a otro, es decir, tiene un significado local. Cada LSR recibe la etiqueta y envía una nueva al siguiente LSR.

La pertenencia de una etiqueta a una FEC, depende de cualquier evento que indique la necesidad de dicha pertenencia, por ejemplo, el ingreso de un nuevo flujo de datos que requiera un tratamiento distinto al de los ya establecidos [16].

#### 2.1.4.1.a Cabecera MPLS



**Figura 2.4:** Cabecera MPLS

Los 20 primeros *bits* forman parte de la etiqueta del MPLS. Este valor puede estar entre 0 y  $2^{20}-1$  (1048575). Los siguientes 3 *bits*; 20, 21 y 22 son *bits* experimentales. Estos *bits* son usados únicamente para calidad de servicio (QoS). fueron llamados experimentales porque en un inicio no se sabía para que pudieran ser usados [13].

El *bit* número 23 es el del Fondo de la Pila, *Bottom of Stack* (BoS). Este *bit* siempre es 0 a menos que la etiqueta se encuentre en la parte inferior de la pila, en ese caso el bit cambia a 1. La pila es el conjunto de etiquetas y se encuentra en la parte superior del paquete. La pila puede tener una o más etiquetas, el número de etiquetas que puede almacenar una pila es infinito, aunque rara vez se encuentra una pila con más de cuatro etiquetas [13].

Los *bits* 24 a 31 son los ocho *bits* utilizados para TTL (*Time to Live*). La función del TTL es la misma que en IP, simplemente se reduce 1 en cada salto con el objetivo de impedir que el paquete se quede atrapado en un bucle infinito de enrutamiento. Si el TTL de la etiqueta llega a 0, el paquete se descarta [13].



**Figura 2.5:** Pila de etiquetas

#### 2.1.4.2 Label Switch Router (LSR)

LSR es un *router* que soporta MPLS. Es capaz de entender etiquetas MPLS y de recibir y transmitir paquetes etiquetados de la capa de enlace. Utiliza algoritmos de enrutamiento IP y algoritmos de distribución de etiquetas. Existen tres tipos de LSRs en una red MPLS [8] [13]:

- *LSR de ingreso (LER)*: Analiza exhaustivamente la cabecera IP, le asigna al paquete una FEC (*Forward Equivalence Class*), crea la cabecera MPLS e inserta la etiqueta en la pila (BoS=0).
- *LSR intermedio*: Recibe un paquete etiquetado entrante, analiza la cabecera MPLS, decrementa TTL, mantiene el campo BoS. Cada nodo en una red MPLS guarda una tabla con referencias a etiquetas de entrada y traducción a las etiquetas de salida.
- *LSR de salida o egreso (LER)*: Retira la cabecera MPLS y permite la salida del paquete a la capa 3. Extrae el campo TTL y lo coloca en el paquete IP. También es llamado *router* de borde al igual que el LSR de ingreso.

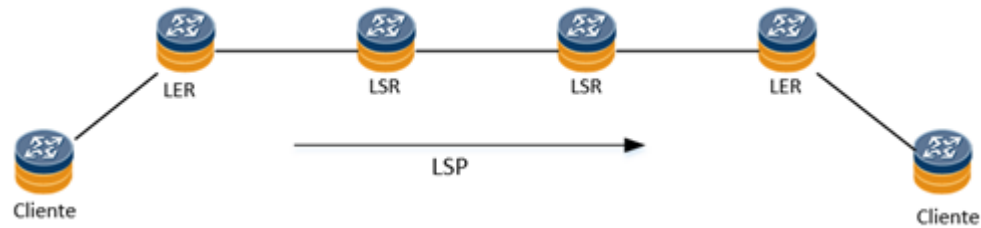
Todo LSR puede realizar sobre las etiquetas las siguientes operaciones [8] [13]:

- *Pop*: El LSR puede remover una o más etiquetas de la cima de la pila antes de enviar el paquete.
- *Push*: El LSR puede colocar una o más etiquetas en el paquete recibido. Si el paquete ya está etiquetado, el LSR puede añadir una o más etiquetas en la pila y enviar el paquete. Si, por otro lado, el paquete aún no ha sido etiquetado, el LSR crea una pila y coloca una etiqueta.
- *Swap*: Cuando un paquete etiquetado es recibido, la etiqueta que se encuentra en la cima de la pila es reemplazada por una nueva etiqueta.
- *Untag*: Es generalmente realizado por el LER de salida y se refiere al hecho de retirar la etiqueta que está en la cima de la pila y enviar el paquete IP al siguiente salto.

#### 2.1.4.3 Label Switched Path (LSP)

Un LSP es una secuencia de LSRs que envían un paquete etiquetado a través de una red MPLS, o parte de la red. Básicamente el LSP es la ruta que los paquetes siguen a través de la red MPLS. La primera LSR de un LSP es la LSR de ingreso, y la última es la LSR de salida. Todos los LSR entre el de entrada y el de salida son LSRs intermedios [13].

El LSP es unidireccional. El LSR de ingreso de un LSP no es necesariamente el primer *router* que etiqueta el paquete, éste podría haber sido ya etiquetado por un LSR anterior; en este caso nos enfrentamos ante un LSP anidado. En los LSP anidados las últimas etiquetas empujan a las anteriores hacia la parte inferior de las pilas [13].



**Figura 2.6:** Componentes físicos de MPLS

#### 2.1.4.4 Forwarding Equivalence Class (FEC)

Un FEC es un conjunto de paquetes que entran en la red MPLS por la misma interfaz, reciben la misma etiqueta y por tanto circulan por un mismo trayecto. Normalmente se trata de datagramas que pertenecen a un mismo flujo. Una FEC puede agrupar varios flujos, pero un mismo flujo no puede pertenecer a más de una FEC al mismo tiempo [8] [13].

A continuación, se presentan algunos tipos de FECs:

- Los paquetes de capa 3 con direcciones IP de destino que coincidan con un determinado prefijo.
- Paquetes de *multicast* que pertenecen a un determinado grupo.
- Los paquetes con el mismo tratamiento de reenvío, basados en la procedencia o en el campo IP *DiffServ Code Point* (DSCP).
- Tramas de Capa 2 que se envían a través de una red MPLS recibidas en una VC o (sub)interface en el LSR de ingreso y transmitidas en una VC o (sub)interface en el LSR de salida.
- Los paquetes de capa 3 con direcciones IP de destino que pertenecen a un conjunto de prefijos BGP, todos con el mismo BGP de siguiente salto.

#### 2.1.4.5 Label Forwarding Instance Base (LFIB)

El LFIB es una tabla que se utiliza para enviar paquetes etiquetados. Dicha tabla es llenada con las etiquetas que entran y salen de los LSPs. La etiqueta de entrada es la etiqueta del enlace local de un LSR en particular.

La etiqueta de salida es la etiqueta de salida de un enlace remoto elegida por un LSR entre todos los posibles enlaces remotos. Todos éstos enlaces remotos se encuentran en el LIB (*Label Information Base*). El LFIB selecciona solo una de las posibles etiquetas de salida de todos los posibles enlaces remotos que se encuentran en el LIB y los instala en el LFIB. La selección de las etiquetas remotas depende de qué ruta es la mejor ruta encontrada en la tabla de enrutamiento.

## 2.1.5 Componentes lógicos de MPLS

### 2.1.5.1 Plano de control

El plano de control es el encargado de cambiar la información de capa 3 por etiquetas y las etiquetas por información de capa 3. Es el conjunto de protocolos que ayudan a configurar los datos. Los principales componentes del plano de control son los protocolos de enrutamiento, la tabla de enrutamiento y otros protocolos de control o señalización usados para la provisión del plano de datos. El plano de control posee mecanismos complejos para el intercambio de información de ruteo como: OSPF, EIGRP, IS-IS y BGP; y el intercambio de etiquetas como: TDP (*Tag Distribution Protocol*), LDP (*Label Distribution Protocol*), BGP y RSVP (*Resource Reservation Protocol*).

### 2.1.5.2 Plano de datos

También conocido como plano de reenvío, es el encargado de reenviar los paquetes a través de un *router* o un *switch* basándose en etiquetas. El plano de datos tiene un sencillo motor de forwarding de paquetes. Este plano mantiene las tablas de intercambio de etiquetas (LFIB).

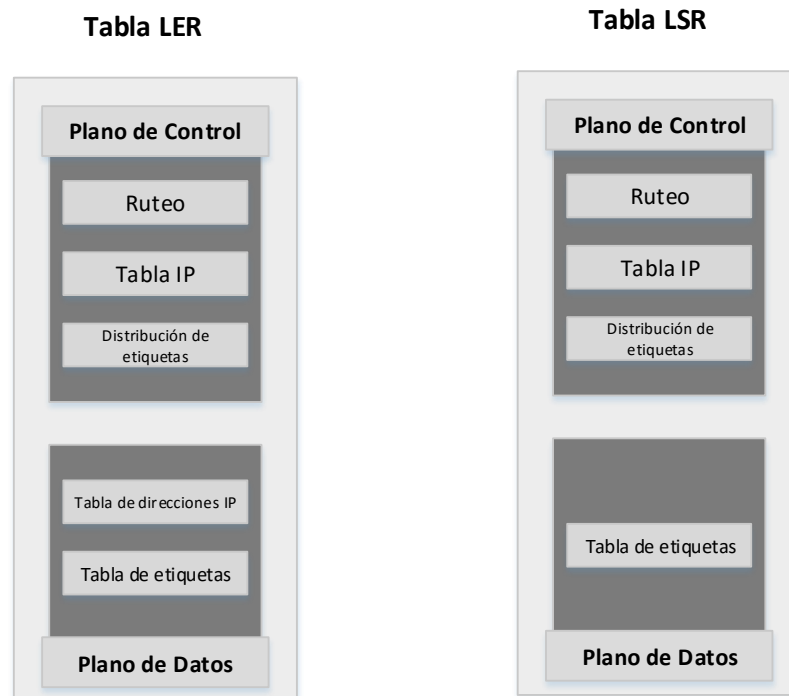
En el plano de datos la carga de un LER es más compleja que la carga de un LSR ya que es en el LER donde se lleva a cabo el ruteo en la tabla de direcciones IP, además el LER se encarga de clasificar los paquetes a diferentes clases de FEC. En la tabla de los LSR no se lee más que la tabla de etiquetas. Ver Figura 2.7 [15].

## 2.1.6 Funcionamiento de MPLS

Una red MPLS es un conjunto de LSRs de capa 2 y LERs de capa 3. Estos



componentes tienen la capacidad de encaminar paquetes, en caso de los LERs, y de conmutar paquetes en base a una etiqueta, en caso de los LSRs. [15] [16]



**Figura 2.7:** Plano de control y plano de datos en un LSR y un LER

Una etiqueta no es más que información añadida al paquete IP por el LER de ingreso. Es un identificador corto de tamaño fijo localmente usado para identificar una FEC. Cada etiqueta define un flujo de paquetes entre dos puntos finales. Una misma etiqueta puede señalar distintas FECs en distintos conmutadores o enrutadores. La etiqueta que se pone en un paquete particular representa la FEC a la cual el paquete es asignado. Cada FEC tiene un camino específico a través de los LSRs, este camino es llamado LSP, y es el motivo por el cual se dice que la tecnología MPLS es orientada a conexión [15] [16].

Cada FEC, además de la ruta de los paquetes también contiene una serie de caracteres que define los requerimientos de QoS del flujo.

Los *routers* LSR de la red MPLS no necesitan examinar ni procesar encabezado IP ya que reenvían paquetes en base únicamente al valor de su etiqueta, esta es una de las ventajas del protocolo MPLS sobre el protocolo IP, ya que éste último requiere que cada enrutador examine la tabla de enrutamiento para saber cuál es el siguiente salto, lo que significa mayor tiempo de procesamiento en cada nodo y, por tanto, mayor duración del recorrido [15] [16].

Por otra parte, los *routers* LER también manejan el encabezado IP. Cuando un paquete llega desde una red externa, el LER de ingreso añade la etiqueta al paquete IP y lo envía hacia la red de LSRs los cuales se encargan de entregarlo al LER de salida, éste le quita la etiqueta y lo envía al siguiente salto de la tabla de enrutamiento. El LER de salida es el encargado de devolver al paquete el dominio IP.

Previo a enviar la información, se establecen los LSPs entre los *routers* encargados de transmitir la FEC. Dichos LSPs sirven como túneles de transporte a lo largo de la red MPLS e incluyen los parámetros QoS específicos del flujo. A cada flujo FEC particular se le asignan etiquetas y de ésta manera se evita el uso de etiquetas globales.

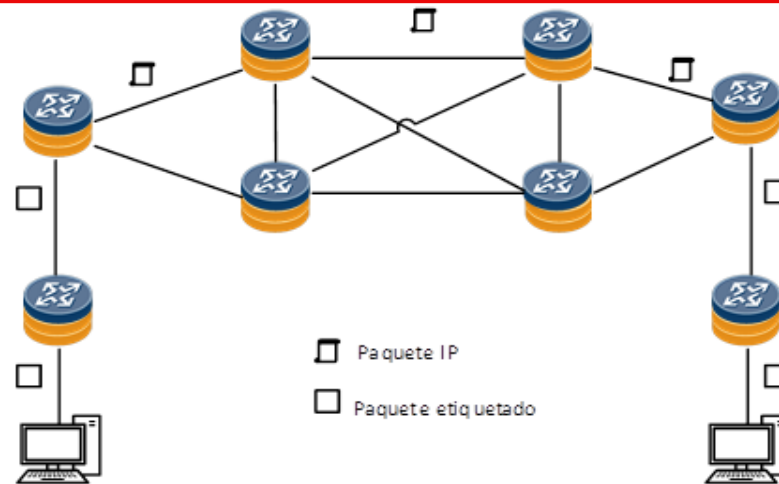
La asignación de nombres y rutas se puede realizar manualmente o utilizando un protocolo de distribución de etiquetas.

Una vez establecidos los LSPs, el paquete entra al dominio MPLS mediante el LER de ingreso el cual es el encargado de determinar qué servicios de red requiere el paquete y así definir su QoS. A continuación, el LSR asigna el paquete a una FEC y a un LSP en particular, lo etiqueta y lo envía. Si no existe ningún LSP, el LER trabaja con los demás LSRs y lo define [15] [16].

Una vez que el paquete está dentro del dominio MPLS, los LSR reciben el paquete con una etiqueta de entrada y le añaden una nueva etiqueta de salida y se envía al siguiente LSR que se encuentra dentro del LSP.

El último LSR del LSP entrega el paquete al LER de salida, el cual es el encargado de quitar la etiqueta y leer el encabezado IP, devolviendo el paquete al dominio IP.

Algunos dispositivos MPLS tienen la capacidad de retirar la etiqueta en el penúltimo LSR, ahorrando así tiempo de procesamiento. Esto se realiza debido a que cuando llega un paquete etiquetado al dispositivo de salida (LER) éste primero realiza una búsqueda en sus tablas, basándose en la información que llega en la etiqueta, una vez determina que debe ser retirada la elimina y procesa el resto del paquete en base a la información de capa red, al retirarla en el penúltimo salto se elimina la necesidad de esta primera búsqueda [17].



**Figura 2.8:** Funcionamiento de una red MPLS

### 2.1.7 Protocolos de Distribución de Etiquetas

El LSR de ingreso es el equipo que crea la primera etiqueta, la cual pasa a formar parte de un LSP. La etiqueta de la cima de la pila de etiquetas se intercambia en cada salto. El LSR de ingreso coloca una o más etiquetas en el paquete. Los LSRs intermedios intercambian la etiqueta superior (etiqueta de entrada) del paquete etiquetado recibido con otra etiqueta (etiqueta de salida) y transmite el paquete en el enlace de salida. El LSR de salida del LSP se despoja de las etiquetas y reenvía el paquete [13].

Cada LSR intermedio debe saber con qué etiqueta de salida debe intercambiar la etiqueta de entrada. Esto quiere decir que se necesita de un mecanismo para que los *routers* sepan que etiquetas deben utilizar al reenviar un paquete. Las etiquetas carecen de un significado global a través de la red, su significado es local. Para que los *routers* adyacentes puedan coincidir la etiqueta de salida con la etiqueta de entrada necesitan una manera de comunicarse entre ellos. Aquí radica la necesidad de un protocolo de distribución de etiquetas.

Se puede distribuir etiquetas de dos maneras [13]:

- *Etiquetas sobre un protocolo de enrutamiento existente*

Este método tiene la ventaja de no necesitar un nuevo protocolo para ejecutarse en los LSRs, pero, por otro lado, cada protocolo de enrutamiento IP existente debe

extenderse para poder llevar las etiquetas, lo cual no es sencillo de lograr. La gran ventaja de que el protocolo de enrutamiento lleve las etiquetas radica en el hecho de que el enrutamiento y la distribución de etiquetas siempre van a estar en sincronía. La implementación de este método en protocolos de enrutamiento vector distancia, tal como es el EIGRP, es sencillo ya que en este tipo de protocolos cada *router* origina un prefijo desde su tabla de enrutamiento entonces lo único que tiene que hacer el *router* es adjuntar la etiqueta a éste prefijo.

Los protocolos de estado del enlace tales como IS-IS y OSPF, no funcionan de la misma manera. Cada *router* origina actualizaciones de estado del enlace que se reenvían sin cambios a todos los *routers* dentro de la misma área. Sin embargo, para que MPLS pueda trabajar, cada *router* necesita distribuir una etiqueta por cada prefijo IGP, y no todos los *routers* originan este prefijo. Los protocolos de ruteo de estado de enlace deben ser modificados para poder cumplir con dicho requerimiento. Por lo tanto, para los protocolos de ruteo de estado de enlace es preferible tener un protocolo distinto que se encargue exclusivamente de la distribución de etiquetas.

- *Protocolo de distribución de etiquetas*

La ventaja de este método es que se tiene un protocolo dedicado únicamente a la distribución de etiquetas, permitiendo el uso de cualquier protocolo de enrutamiento para la distribución de prefijos. La desventaja, evidentemente, es que el LSR tendrá la carga de otro protocolo.

Para obtener los paquetes que se envían a través de un LSP en la red MPLS, todos los LSRs deben ejecutar el mismo protocolo de distribución de etiquetas. Una vez que todas las etiquetas de un LSR pertenezcan a una FEC en particular, los paquetes pueden ser enviados sobre el LSP por medio de un intercambio de etiquetas en cada LSR que envía los paquetes. Cada LSR debe revisar la tabla LFIB para saber qué operación realizar sobre las etiquetas.

El LFIB es la tabla que reenvía los paquetes etiquetados. Es rellena por los enlaces de etiquetas que se encuentran en el LIB. Por otra parte, la tabla LIB es rellena por los enlaces de etiquetas recibidos por LDP, RSVP, MP-BGP, o los enlaces de etiquetas asignados de manera estática. Los protocolos usados para la distribución de etiquetas son:

- *Tag Distribution Protocol (TDP)*

- 
- *Label Distribution Protocol (LDP)*
  - *Constraint-based routing LDP (CR-LDP)*
  - *Border Gateway Protocol (BGP)*
  - *Resource Reservation Protocol (RSVP)*

#### **2.1.7.1 Tag Distribution Protocol (TDP)**

TDP es el primer protocolo de distribución de etiquetas. Fue desarrollado e implementado por Cisco. Es un protocolo que se ejecuta en la capa de transporte [13].

TDP es compatible con varios protocolos de la capa de red, como son: Ipv4, Ipv6, IPX. Además, proporciona los medios para abrir, editar y cerrar sesiones TDP e indica si han ocurrido errores durante estas sesiones. El protocolo TDP es transportado mediante TCP; sin embargo, hoy en día este protocolo ha quedado obsoleto ya que ha sido reemplazado por LDP el cual tiene una forma de operación similar, pero ofrece mayores prestaciones [13].

#### **2.1.7.2 Label Distribution Protocol (LDP)**

LDP es el protocolo encargado de la distribución de etiquetas para rutas internas. Todos los LSRs directamente conectados deben establecer una sesión LDP entre ellos. Los pares LDP intercambian mensajes de asignación de etiquetas durante el período de sesión LDP. Una etiqueta es un enlace a una determinada FEC [13]. LDP tiene cuatro funciones principales:

- Descubrir LSRs que ejecuten LDP
- Establecer y mantener una sesión
- Anunciar los enlaces de etiquetas
- Notificar errores y advertencias

#### **2.1.7.3 Constraint-based routing LDP (CR-LDP)**

El protocolo CR-LDP es una extensión del *Protocolo de Distribución de Etiquetas* (LDP). CR-LDP es un protocolo que soporta los requerimientos de ingeniería de tráfico.

---

Este enrutamiento está basado en restricciones y al igual que cualquier LSP, CR-LSP es una ruta a través de una red MPLS [13].

Mientras los LSPs son configurados únicamente sobre la base de la información de un sistema de gestión o en las tablas de enrutamiento, los CR-LSPs pueden ser restringidas por retardo (*delay*), ancho de banda, número de saltos, calidad de servicio, ancho de banda, variación de retardo (*jitter*) y otras restricciones que pueden aparecer en la ruta.

El protocolo CR-LDP permite tener restricciones diferentes en nodos diferentes. Además, es capaz de seleccionar la ruta óptima para el envío de datos, es decir, no solo se basa en la longitud de la ruta sino también en la carga de tráfico que tiene cada ruta [13]. CR-LDP utiliza UDP para descubrir LDP peers y TCP para la petición, control y administración de etiquetas.

#### **2.1.7.4 Border Gateway Protocol (BGP)**

BGP ofrece gran escalabilidad en las redes MPLS gracias a que utiliza etiquetas para el envío de información agregada, además permite el uso de diferentes jerarquías de enrutamiento. BGP juega un papel importante en la separación entre el plano de control y el plano de envío [13].

Los diferentes componentes de la red transmiten únicamente la información que se requiere para que puedan cumplir con su función específica, por ejemplo, la única información que los LSRs requieren es la de etiquetamiento y la información de la red interna para poder conmutar los paquetes a su destino.

El protocolo BGP es el encargado de llevar información de enrutamiento externo, por ejemplo, información de enrutamiento de Internet.

Solamente los LSRs de salida y de entrada necesitan revisar la tabla de enrutamiento para poder conocer el destino de sus paquetes, esto significa que son los *routers* LERs los que necesitan ejecutar BGP [13].

---

### 2.1.7.5 Resource Reservation Protocol (RSVP)

RSVP es un protocolo de señalización, fue originalmente diseñado para la señalización de servicios integrados (*Int-Serv*) y actualmente es usado para señalar los túneles de TE (*Traffic Engineering*). En otras palabras, RSVP señala calidad de servicio (QoS) en toda la red.

RSVP utiliza mensajes PATH y RESV para señalar una ruta. El *router* que se encuentra en la cabecera TE envía los mensajes PATH hacia el *router* de cola, mientras que, los mensajes RESV son enviados por la misma ruta, pero en sentido opuesto. El *router* de cabecera de un túnel TE se encarga de calcular la mejor ruta que el túnel TE debe tomar de la base de datos TE, teniendo en cuenta el ancho de banda y otras limitaciones.

### 2.1.8 Modelo de Servicios Diferenciales (Diff-Serv)

Durante mucho tiempo se ha buscado nuevas formas de brindar calidad de servicio a las redes de computadoras. La IETF ha propuesto algunos modelos, entre ellos Diff-Serv, la cual, se detalla a continuación [19]:

Diff-Serv es un conjunto de tecnologías las cuales permiten a los proveedores de servicios ofrecer diferentes niveles de calidad de servicio para distintos clientes y tráfico de datos. Se basa únicamente en el marcado de paquetes, no hay reserva de recursos por flujo, no hay protocolo de señalización ni tampoco información del estado de los *routers*.

El proceso de tratamiento diferenciado de paquetes IP en los enrutadores se basa en la asignación de prioridades y en la división del tráfico en distintas clases. Las características de los paquetes se pueden especificar en términos estadísticos o cuantitativos del rendimiento, la inestabilidad, la pérdida o el retardo. También se puede especificar en términos de prioridad al acceso de los recursos de la red.

Este modelo no requiere estrictamente que en todos los nodos de la red se tenga implementada esta arquitectura. Con el etiquetado de paquetes que el Diff-Serv propone, se logra que los paquetes pertenecientes a una misma clase, sean tratados de la misma manera.

La diferenciación de servicios se lleva a cabo en cada uno de los dispositivos de

interconexión, a éste hecho se le conoce como PHB (*Per Hop Behavior*, Comportamiento por salto).

El PHB indica el tráfico que corresponde a un determinado paquete, además, especifica la prioridad del enrutamiento de los paquetes en los *routers*.

En el Diff-Serv, tanto los LERs como los LSRs tienen distintas responsabilidades dentro de la red MPLS, mientras que, los LERs realizan funciones tales como son: control de admisión, acondicionamiento, vigilancia y contabilidad del tráfico. Los LSRs dependerán solamente de la clase de servicio asociada a cada paquete.

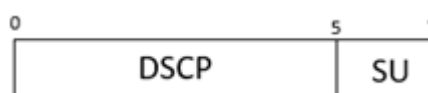
Diff-Serv proporciona soporte escalable para datos y voz sobre una misma infraestructura, además el contenido de los paquetes se inspecciona una sola vez para luego clasificarlos, lo que implica reducción de procesamiento. Este modelo permite también definir muchos tipos de tráfico y el proceso de señalización es más sencillo que en Int-Serv.

Por otro lado, la ausencia de control de admisión por flujo o por sesión da paso a que las aplicaciones se congestionen entre sí.

### *Campo Servicio Diferencial (DS)*

El campo DS es un campo creado con el objetivo de sustituir al campo ToS (Type of Service) en IPv4.

El campo DS está formado por 8 *bits*, 6 de los cuales son usados para la diferenciación de servicios y para determinar qué PHB recibirá el paquete. Los dos *bits* restantes están reservados para uso futuro.



**Figura 2.9:** Campo Servicio Diferencial (DS)

El campo DSCP permite definir hasta 64 posibles categorías de tráfico.

*Arquitectura Diff-Serv [19]:*



Clasificador: Guía los paquetes con características similares hacia los procedimientos de condicionamiento de tráfico.

Medidor: Envía la información hacia las funciones de acondicionamiento.

Acondicionador: Mantiene el retardo lo suficientemente pequeño. Tiene un tamaño de cola finito, lo cual permite descartar el paquete cuando ya no exista suficiente espacio dentro de la cola.

Marcador: Se puede configurar el marcador para señalar los paquetes mediante un conjunto de códigos de DS para seleccionar un PHB. Al momento en el que el marcador cambia el código DS de un paquete, se dice que el paquete fue remarcado.

Descartador: Descarta los paquetes que pertenecen a un determinado flujo de tráfico con el objetivo de evitar congestión.

*Tipos de servicio en Diff-Serv:*

Expedited Forwarding (EF): Es el servicio que ofrece mayores garantías respecto al caudal, tasa de pérdidas, retardo y *jitter*. Este servicio equivale a una línea dedicada. Tiene un valor de 101110 en DSCP.

Assured Forwarding (AF): Asegura un trato preferente pero no fija garantías. Además, garantiza una determinada cantidad de ancho de banda a una clase AF y si está disponible permite el acceso a ancho de banda adicional. Hay cuatro clases de AF. La Tabla 2.1 exhibe el valor de DSCP para la clase AF correspondiente.

Prioridad	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Baja	001010 AF11 DSCP 10	010010 AF21 DSCP 18	011010 AF31 DSCP 26	100010 AF41 DSCP 34
Media	001100 AF12 DSCP 12	010100 AF22 DSCP 20	011100 AF32 DSCP 28	100100 AF42 DSCP 36
Alta	001110 AF13 DSCP 14	010110 AF23 DSCP 22	011110 AF33 DSCP 30	100110 AF43 DSCP 38

**Tabla 2.1:** Assured Forwarding. Clases y prioridades.

Best Effort, con prioridad (BF): No existen garantías, pero tiene un trato

---

preferente con respecto a Best Effort sin prioridad.

Best Effort, sin prioridad: No tiene ninguna garantía.

### **2.1.9 Modelo de Servicios Integrales (Int-Serv)**

En 1994 la IETF definió la arquitectura de los Int-Serv, la cual pretendía ampliar la arquitectura IP para soportar actividades en tiempo real, como son: telefonía, realidad virtual, audio y video.

El concepto de flujo juega un papel fundamental en la arquitectura Int-Serv, este se define como un continuo tráfico de datagramas relacionados entre sí. El tráfico se produce como consecuencia de una acción de un usuario, es unidireccional y es la entidad más pequeña a la cual se le puede asignar una determinada QoS. Los flujos pueden ser agrupados por clases, todos los flujos que pertenecen a una misma clase reciben el mismo QoS.

Int-Serv brinda un nivel garantizado de servicio a las aplicaciones, negociando punto a punto los parámetros de red. La aplicación solicita el nivel de servicio que ella requiere para operar de manera apropiada y se basa en QoS para que se reserven los recursos de red necesarios antes de que la aplicación comience a operar. Las reservaciones realizadas por QoS se mantienen activas hasta que el ancho de banda que la aplicación requiere sobrepase el límite reservado o hasta que la aplicación termina.

En el modelo Int-Serv se tiene una QoS discreta por flujo, lo que hace que sea arquitecturalmente conveniente para controlar la admisión de llamadas de voz. La mayor desventaja del modelo Int-Serv es su baja escalabilidad.

*Servicios de la arquitectura Int-Serv [20]:*

Servicio Garantizado: Garantiza un retardo máximo y caudal mínimo. Todos los *routers* que se encuentren en el trayecto del datagrama deben ofrecer las garantías solicitadas.

Servicio de carga controlada: Permite solicitar recursos a la red sin considerar

---

aspectos temporales de la misma, tal como es el retardo.

Servicio de Mejor Esfuerzo: Este servicio no ofrece QoS ni tiene garantía.

### *Arquitectura Int-Serv*

Componentes básicos de la arquitectura Int-Serv:

- *Clasificador de paquetes*: Determina la clase a la que pertenece el paquete mediante el análisis de los campos de direcciones y puertos.
- *Control de admisión*: Se encarga de comprobar la existencia de los recursos suficientes para soportar el servicio solicitado.
- *Planificador de paquetes*: Gestiona la transmisión de paquetes mediante la aplicación de algoritmos de encolado.
- *RSVP*: Cuando una aplicación solicita un servicio a la red, éste protocolo entrega la petición al control de tráfico de cada uno de los *routers* que comprobarán si la petición es viable.

## **2.1.10 Mecanismo de gestión de colas**

La teoría de colas se encarga de la gestión de las colas o líneas de espera que se originan conforme usuarios o aplicaciones demanden un servicio. La teoría de colas estudia fenómenos tales como el tiempo que se demora el sistema en gestionar los paquetes que esperan en cola sin que el sistema colapse [21] [22].

Existen varios mecanismos de gestión de colas, a continuación, se mencionan las más importantes:

### **2.1.10.1 FIFO (First in, First out)**

Es el mecanismo de gestión de colas más utilizado por su sencillez de implementación y facilidad al momento de calcular el retardo de cola, ya que éste está limitado a la capacidad de su *buffer*. Este mecanismo se basa en que los paquetes que llegan primero son los primeros en enviarse. FIFO no distingue por clases el tráfico ni los flujos, es decir, trata de la misma manera a todos los paquetes, por lo cual no es un

---

mecanismo recomendable para QoS [22].

#### **2.1.10.2 PQ (Priority Queueing)**

Este mecanismo de gestión de colas clasifica el tráfico por clases. Este tráfico es ordenado por colas según la prioridad que se le otorgue a cada clase. Cada una de las colas tiene un comportamiento FIFO. Este esquema es útil para calidad de servicio. El problema con este modelo es que podría darse el caso de que la cola del tráfico con mayor prioridad sea muy grande y por tanto no dé espacio a gestionar el tráfico de menor prioridad, cayendo así en un estado de inanición [21].

#### **2.1.10.3 FQ (Fair Queueing)**

Este mecanismo encola paquetes de acuerdo a su flujo y utiliza el algoritmo *Round Robin* para despachar los paquetes, este algoritmo toma el paquete que se encuentre en la cabecera de cada cola, de manera cíclica, saltándose la cola que se encuentre vacía o sin paquetes.

El posible problema que este algoritmo podría presentar es que los paquetes sean de distinto tamaño en cada cola, así que si lo que se desea es que para cada flujo se asigne la misma cantidad de ancho de banda, una solución sería tomar una determinada cantidad de *bits* por cola en lugar de un paquete completo, pero si lo que se desea es otorgar mayor ancho de banda a determinado flujo cuyos paquetes son, en tamaño, superiores a los paquetes de los demás flujos, se puede dejar que el algoritmo *Round Robin* trabaje por paquetes y no por cantidad de *bits*. FQ soluciona el problema de PQ, mas no ofrece diferenciación de servicios [21].

#### **2.1.10.4 WFQ (Weighted Fair Queueing)**

WFQ trabaja de manera similar que FQ, pero con la diferencia que WFQ brinda diferenciación de servicios en términos de ancho de banda. WFQ da prioridad al tipo de flujo que consume menor cantidad de ancho de banda, de ésta manera libera rápidamente el espacio de *buffer*, dando paso a aplicaciones con mayores necesidades de ancho de banda. El problema que presenta WFQ es su alta complejidad computacional [22].

---

### 2.1.10.5 WRR (Weighted Round-Robin)

WRR es capaz de soportar flujos de tráfico con distintos anchos de banda, asegurando al mismo tiempo que las colas con baja prioridad tengan un espacio en el *buffer* y se les asigne ancho de banda de salida.

Este algoritmo asegura que por lo menos un paquete de cada cola se mueva en cada ronda. Para las colas de mayor prioridad se permite enviar más de un paquete en su turno o a su vez otorgar más de un turno a esa cola en cada ronda. El limitante de éste mecanismo aparece en el momento en el cual se varíe demasiado los tamaños de los paquetes, si eso sucede WRR es incapaz de mantener la distribución de ancho de banda previamente configurada [22].

### 2.1.10.6 DWRR (Deficit Weighted Round Robin)

El algoritmo DWRR es capaz de soportar un ancho de banda variable con un bajo coste computacional. Este mecanismo cuenta con los siguientes parámetros [21]:

- **Weight:** Es un peso que define el porcentaje de ancho de banda que se le va a otorgar a cada una de las colas.
- **Déficit Counter:** Este parámetro define la cantidad de *bytes* máxima que las colas pueden transmitir en cada ronda, si el tamaño de un paquete sobrepasa el valor nominal, tendrá que esperar para transmitirse en la siguiente ronda.
- **Quantum:** Es proporcional al peso de cada cola y es la variable encargada de aumentar el valor del *Déficit Counter*.

De ésta manera, cada vez que se pretende enviar un paquete, la variable *Déficit Counter* cambia su valor al valor del *Quantum*, si el paquete es más grande que el valor del *Déficit Counter*, entonces se salta a la siguiente cola; caso contrario, si el tamaño del paquete es igual o menor que el valor del *Déficit Counter*, entonces el valor de esta variable se reduce al tamaño del paquete y éste último es transmitido. El procedimiento continúa hasta que el valor del *Déficit Counter* llegue a ser cero, lo que sucede cuando se ha vaciado la cola [21].

---

## **2.2 Redes de nueva generación y servicio integrado *Triple Play***

### **2.2.1 Redes de Nueva Generación y Convergencia de Servicios**

#### **2.2.1.1 Redes de Nueva Generación (NGN)**

Las redes de nueva generación (NGN) basan su desarrollo en la convergencia de servicios (Internet, voz, televisión) mediante el diseño de una única infraestructura de telecomunicaciones, la misma que permitirá manejar los requerimientos de cada servicio de forma óptima.

Las redes convencionales soportan un tipo de infraestructura por cada tipo de servicio, es decir el acceso a los servicios de Internet o teléfono están administrados por diferentes proveedores que manejan su propia infraestructura. En la actualidad las NGN buscan que todos los servicios se manejen por una misma infraestructura mediante el protocolo IP, el mismo que transmite la información de cada servicio mediante paquetes encapsulados a través de Internet.

Según la ITU una “NGN es una red basada en la transmisión de paquetes la cual permite ocupar el máximo ancho de banda del canal, aplicando técnicas de QoS, esto permite que los servicios sean transportados de forma independiente a la infraestructura de red. De igual manera las NGN permiten una libre competencia, es decir, que las compañías puedan ofertar servicios convergentes en iguales condiciones y que los usuarios tengan acceso libre a contratarlos” [23].

#### **2.2.1.2 Tecnología de las Redes de Nueva Generación (NGN)**

Las redes de nueva generación migran de la conmutación de circuitos a la conmutación por paquetes, de tal forma que la información transmitida se transforma en información digital lo que permite lograr sistemas convergentes en el cuál los servicios pueden utilizar un mismo canal de transmisión.

El medio (capa física) está basado en el protocolo de Internet IP (Figura 2.10) para plataformas multiservicio, esto posibilita que se integren servicios de telefonía, televisión e Internet usando una misma infraestructura (Figura 2.11), obteniendo como ventajas una única gestión y tarificación para todos los servicios, además de la disminución de costos tanto para el usuario como para el proveedor.



**Figura 2.10:** Convergencia de protocolos en las Redes de Nueva Generación (NGN)



**Figura 2.11:** Convergencia de servicios en las Redes de nueva Generación (NGN)

### 2.2.1.3 Red Multiservicios

Redes multiservicios son redes implementadas para brindar servicios de voz, Internet y televisión con velocidades de transferencia elevadas, estas redes abarcan servicios *Triple Play* lo cual permite la integración de servicios en una misma infraestructura. La red multiservicios consta de tres partes:

**Proveedor:** El proveedor tiene como función administrar y controlar la generación de la información multimedia de los servicios, ésta será transmitida en tiempo real o almacenada en una base de datos. El proveedor es el encargado de realizar el estudio de mercado para implementar el diseño de red, con el objetivo que este soporte el tráfico a corto plazo y sea escalable a largo plazo.

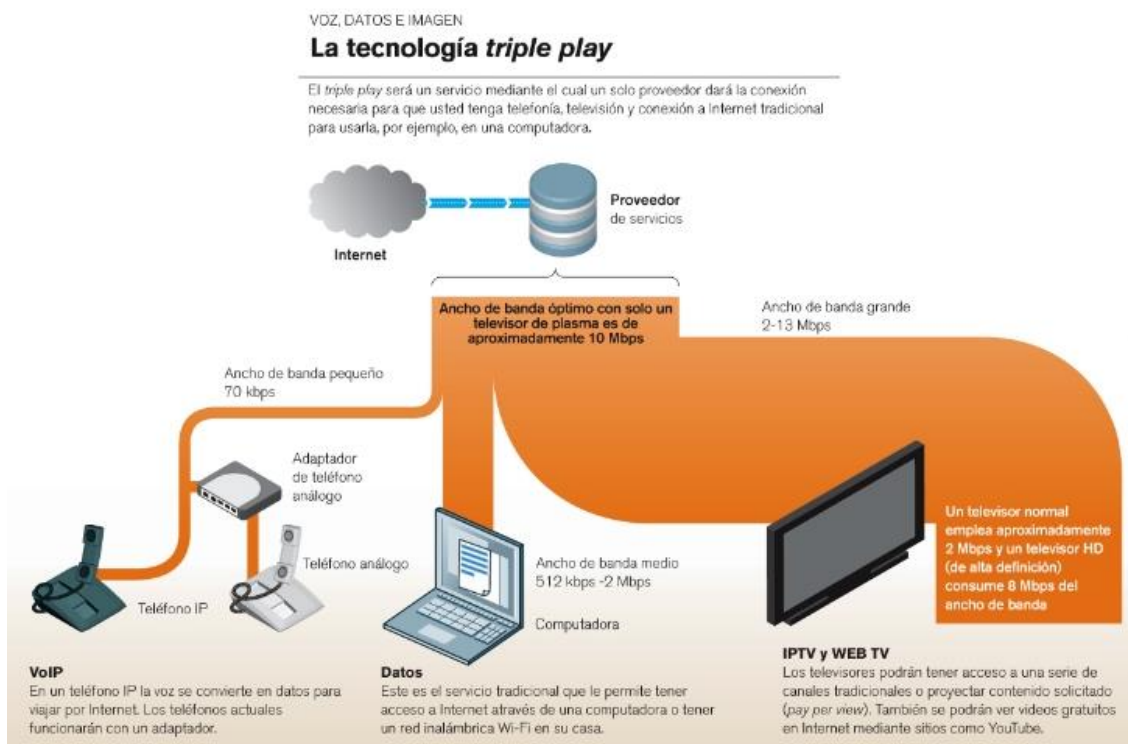
**Usuarios:** Los usuarios representan la demanda del servicio, cuentan con un dispositivo de control que permite acceder a los diferentes servicios multimedia contratados. El diseño de la red se basa en los potenciales usuarios que pudieren contratar los servicios multimedia de una empresa proveedora.

**Transporte:** El sistema de transporte es el encargado de llevar todas las peticiones de los usuarios hacia el servidor de servicios, a esta acción se la denomina *downlink*, en cambio cuando se envía los contenidos multimedia solicitados por el usuario se conoce como *uplink*.

## 2.2.2 Sistema *Triple Play*

### 2.2.2.1 Servicios *Triple Play*

*Triple Play* se define como el empaquetamiento de servicios y contenidos multimedia (Internet, voz, televisión) que se transmiten a través de un mismo medio mediante la convergencia de servicios [24].



**Figura 2.12:** Análisis de la tecnología *Triple Play* [24]

La diferencia del sistema integrado *Triple Play* con tecnologías anteriores radica en que todos los servicios se manejan por un único medio físico, configurando un solo enlace entre el cliente y el servidor (proveedor).

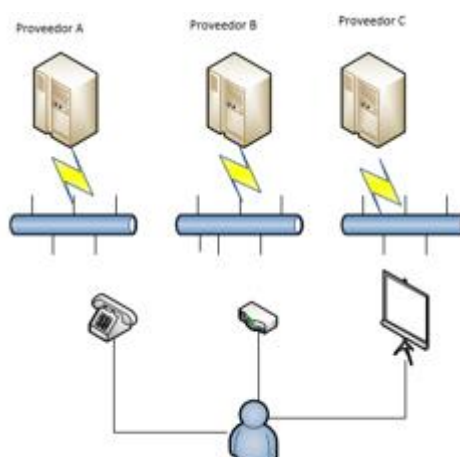


**Figura 2.13:** Integración de Servicios en la tecnología *Triple Play*

Con las redes actuales no ha sido posible manejar servicios de paga: telefonía, Internet y televisión a través de un único medio de comunicación (Figura 2.14), en cambio con el desarrollo del servicio integrado *Triple Play* es posible integrar los



servicios mediante la convergencia.



**Figura 2.14:** Infraestructura para diferentes servicios en las redes de telecomunicaciones actuales

La evolución en el sector de las telecomunicaciones junto con el crecimiento de acceso a las TICs (Tecnologías de la Información y Comunicación), han permitido que se desarrollen redes de empaquetamiento de servicios tal como el servicio integrado *Triple Play*, algunas de las características de los servicios que componen *Triple Play* son:

Voz	Video	Internet
Procesamiento básico de llamadas (transferencia, línea de espera).	Videoconferencias.	Banda ancha.
Aplicación de mensajes (correo de voz).	Interactividad.	Correo.
Aplicación inteligente de procesamiento de llamadas (privacidad, remarcado automático).	Video bajo demanda.	Archivos.

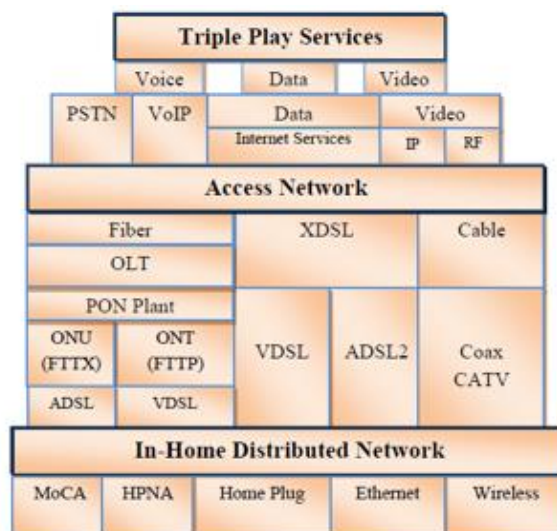
**Tabla 2.2:** Características de servicios de voz, video y datos en el servicio integrado *Triple Play*

### 2.2.2.2 Arquitectura para el servicio integrado *Triple Play*

La implementación de los servicios de Internet, voz y televisión requiere de cambios significativos en la arquitectura de la red actual. El servicio integrado *Triple Play* difiere del servicio tradicional de Internet, el cual se basa en la política de “mejor esfuerzo”. Esto significa que debido al hecho de que los usuarios no están en línea al mismo tiempo, la agregación de tráfico desde múltiples usuarios aumenta la carga de la red.

*Triple Play* incluye servicios en tiempo real, como voz y vídeo. Este tipo de servicios tienen requisitos estrictos de retardo de extremo a extremo, *jitter* y ancho de

banda. Por lo tanto, el servicio integrado *Triple Play* no se considera como servicio de “mejor esfuerzo”. Como resultado, *Triple Play* postula un nuevo tipo de arquitectura de servicio como se puede observar en la siguiente Figura.



**Figura 2.15:** Diagrama de bloques de la arquitectura para el servicio integrado *Triple Play* [25]

### 2.2.2.3 Estructura para el servicio integrado *Triple Play*

Dentro de la estructura del servicio integrado *Triple Play* se maneja diferentes redes: núcleo, distribución y acceso [26]. Cada una cumple con una función determinada para implementar los servicios sobre IP. Cada red tiene diferentes requerimientos, además que cada una interactúa entre sí.

**Red núcleo:** La red núcleo es la encargada de administrar el tráfico que viene desde los servidores hasta los usuarios, ésta debe ser de alta gama debido a que soportará tanto las peticiones del usuario como las respuestas del servidor, es decir un tráfico cliente-servidor. La función principal es la de soportar todo el volumen de tráfico que se puede generar en el peor de los escenarios dentro de la topología de red diseñada, existen diferentes tecnologías que pueden soportar estos requerimientos tal es el caso de MPLS.

**Red de distribución:** La red de distribución se conecta por un lado con el enlace troncal de la red núcleo y por el otro con la red de acceso, por lo general la red llega hasta los postes de luz residenciales junto con el cableado de las instalaciones eléctricas.

**Red de Acceso:** Es la red de comunicación con el usuario, se define desde las centrales de gestión hacia la casa del usuario, para esto se requiere de una conexión a tierra y un conector para el dispositivo de control denominado módem, si el número de receptores es mayor de uno se utiliza divisor de señales para la comunicación.

#### 2.2.2.4 Servicios que integran *Triple Play*

##### 2.2.2.4.a Servicio de Voz sobre IP (VoIP)

Voz sobre IP (VoIP) se refiere al transporte de tráfico de voz en tiempo real usando la red de datos por medio del protocolo IP, permitiendo el establecimiento de llamadas telefónicas gracias al manejo de *software* y hardware por parte de IP. En las redes VoIP se deben considerar algunos aspectos [27]:

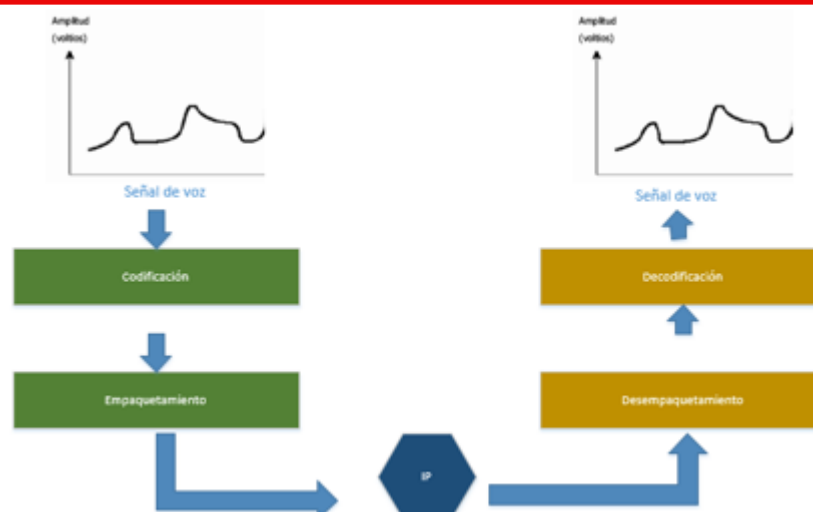
**Muestreo:** La tasa de muestreo es el número de muestras que se toman de la señal en una unidad de tiempo pasando de su estado continuo a un estado discreto, proceso necesario para la digitalización de la señal.

**Codificación:** La codificación es necesaria para reducir el ancho de banda y la componente continua de la señal, para lo cual se utilizan diferentes métodos de acuerdo al tipo de información que se maneje.

**Códec:** Convierte las señales analógicas en digitales mediante la compresión de la señal y por el proceso inverso convierte la señal de digital en analógica al final del tramo de comunicación, en redes VoIP el códec permite codificar la voz y transmitirla a través de redes IP.

En las redes de conmutación de paquetes para transmitir VoIP se siguen varios procesos comenzando por el muestreo de la señal mediante el cual se digitaliza la señal de su origen analógico; después de obtener la información en binario se codifica por bloques, según sea el tipo de codificador será el número de *bits* que contenga cada bloque; luego se empaqueta uno o más bloques lo cual se interpreta como una encapsulación, el empaquetado depende de los protocolos que se utilicen.

La información en el receptor sigue un proceso inverso se desempaqueta, decodifica y se reconstruye la información para obtener la señal analógica inicial.



**Figura 2.16:** Transporte del servicio de voz en redes IP para el servicio *Triple Play*

El rendimiento de la red está ligado a la carga de tráfico que tengan los diferentes nodos por el cual pasa la información, los paquetes pueden sufrir retardos al tener que esperar ser transmitidos o también pueden sufrir pérdidas. Si estos inconvenientes suceden en el proceso de la comunicación la información transmitida puede llegar incompleta, a nivel de calidad se traduce como una degradación del servicio.

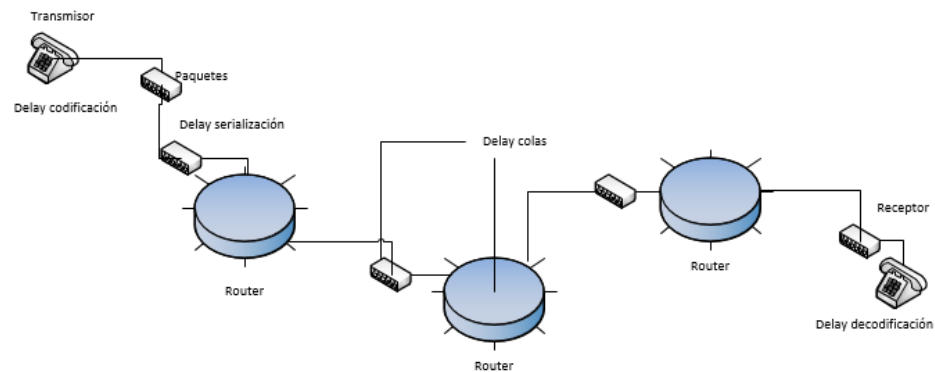
### Parámetros del servicio de voz sobre IP

El servicio de voz debe cumplir con una adecuada calidad de la señal para garantizar el éxito en una llamada, existen algunos parámetros que permiten evaluar la calidad del mismo:

- **Pérdida de paquetes:** En el servicio de voz no se puede retransmitir los paquetes por lo tanto la pérdida de los mismos constituye una degradación de la calidad del servicio, lo que se representa como la deformación en el mensaje recibido.
- **Latencia:** Es el tiempo en que se demora transmitir un paquete desde el origen hasta el destino, este tiempo se denomina retardo y la latencia es la suma de los retardos.

La Recomendación UIT-T G.114 indica que el retraso o latencia global de extremo a extremo para comunicaciones de voz puede ser de hasta 150 ms sin que sea percibido por los usuarios. Cuando el retraso es superior a 150 ms aparecen gradualmente efectos negativos [28].

Algunos autores aconsejan que 200 ms sigue siendo un buen nivel y algunos otros confirman que hasta 400 ms se pueden aceptar en llamadas de larga distancia [28].



**Figura 2.17:** Retardos para el servicio VoIP

- **Jitter:** Es el tiempo variable que tienen los paquetes al no ser transmitidos a la misma velocidad, causando que la reconstrucción de la señal no se haga de forma adecuada, para esto se diseña un *buffer* que minimice el impacto.

### Códecs para el servicio de Voz sobre IP

Para transmitir voz por la red IP se utilizan códecs que garanticen compresión y codificación, así como la decodificación y descompresión. El ancho de banda necesario para soportar el servicio de voz depende del códec utilizado. Entre los códecs de voz más importantes están [27]:

- **Códec G.711 (u-law y a-law):** Es un estándar de ITU-T que utiliza codificación PCM (Modulación por Pulsos Codificados), utiliza un ancho de banda de 64 Kbps, pero no tiene técnicas de compresión. G.711 tiene bajos requerimientos de procesamiento, por lo que es el códec que ofrece la mejor calidad en comparación con cualquier otro, su frecuencia de muestreo es de 8 Kbps.

El uso para VoIP de este códec ofrece la mejor calidad, presentando el menor retardo por algoritmo 0,125ms, sin embargo, necesita de una tasa de *bits* de 64 Kbps que es mayor que para otros códecs que son implementados para VoIP.

- **Códec G.722:** Es un estándar de ITU-T, utiliza modulación ADPCM (Modulación por Pulsos Codificados Diferencial Adaptativo) que es una versión mejorada de PCM con AD adaptación diferencial, tiene una velocidad hasta 64 Kbps.

Las tasas de datos son de 48, 56 y 64 Kbps, los dos primeros modelos tienen un canal de datos auxiliar de 8 Kbps y 16 Kbps respectivamente.

- **Códec G.726:** Es un códec con modulación ADPCM, sirve para transmisión de voz y utiliza tasas de 16 Kbps, 24 Kbps, 32 Kbps y 40Kbps. Este códec reemplazó a G.721 que tenía una tasa de 32 Kbps y G.723 que cubría tasas de 24 Kbps y 40 Kbps ambos con modulación ADPCM, además añadió la tasa de 16 Kbps.

- **Códec G.729:** Es un códec de compresión de datos para voz, comprime el audio en tramas de 10 ms. Para los servicios de VoIP es uno de los códecs más utilizados debido a sus prestaciones, la técnica que utiliza es CS-CELP (Code-Excited Linear Prediction Speech Coding) la cual brinda calidad similar a la del códec GSM y reduce el tamaño de la señal en proporción 8:1. El algoritmo CS-CELP trabaja con bloques de 80 muestras muestreadas a 8 kHz. Presenta una tasa de *bits* de 8 kbit/s. El retardo de codificación del códec G.729 es de 15 ms. En la Tabla 2.3 se observa los diferentes códecs para el servicio de voz con sus respectivas características.

#### 2.2.2.4.b Servicio de Televisión sobre IP (IPTV)

IPTV se presenta como un sistema de audio y video de gran prestación transmitido sobre el protocolo IP con un ancho de banda garantizado para su correcta difusión, presentándose como una alternativa nueva para los usuarios de televisión por pago.

En los sistemas IPTV existen diferentes herramientas que permiten interactuar de mejor manera con el usuario, el cual tendrá opciones de diferentes servicios. El servicio de IPTV se puede clasificar en tres grupos principales:

- Televisión en vivo, con o sin interactividad relacionada con el programa de televisión actual.
- Televisión en diferido: vuelve a reproducir el programa de televisión que se emitió hace horas o días.

- Video bajo demanda (VoD): navegar por un catálogo de vídeos, no relacionadas con la programación de televisión.

IPTV se distingue de televisión por Internet por su proceso de estandarización y sus escenarios de implementación desplegados para suscriptores, está basado en redes de telecomunicaciones con canales de acceso de alta velocidad en las líneas finales de los usuarios quienes reciben el servicio a través de set-top boxes u otros equipos para clientes [30].

Velocidad de bits y códec (kbps)	Ejemplo de tamaño del códec (bytes)	Ejemplo de intervalo del códec (ms)	(MOS)	Tamaño de la carga útil de voz (bytes)	Tamaño de la carga útil de voz (ms)	Paquetes por segundo (PPS)	Tamaño de Carga Útil (bytes)	Ancho de banda c/cRTP MP o FRF.12 (kbps)	Ancho de banda Ethernet (kbps)
G.711 (64 kbps)	80 bytes	10 ms	4,1	160 bytes	20 ms	50	160 bytes	67,6 kbps	87,2 kbps
G.722 (64 kbps)	80 bytes	10 ms	4,13	80 bytes	20 ms	50	160 bytes	64 kbps	87,2 kbps
G.726 (32 kbps)	20 bytes	5 ms	3,85	80 bytes	20 ms	50	80 bytes	35,6 kbps	55,2 kbps
G.726 (24 kbps)	15 bytes	5 ms		60 bytes	20 ms	50	60 bytes	27,6 kbps	47,2 kbps
G.729 (8 kbps)	10 bytes	10 ms	3,92	20 bytes	20 ms	50	20 bytes	11,6 kbps	31,2 kbps

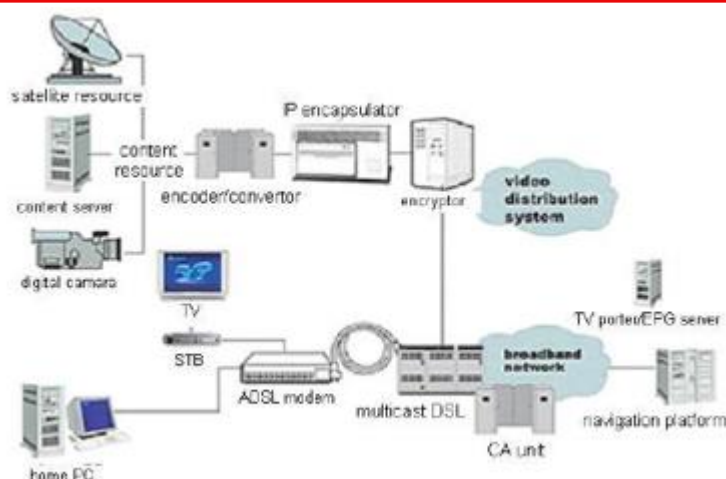
**Tabla 2.3:** Tabla de códec para el servicio de VoIP [29]

### Parámetros del servicio de televisión sobre IP

El proceso de transmisión de IPTV empieza con el servidor en el cual está albergado el servicio de video, se digitaliza la señal mediante un codificador y se encapsula en paquetes IP, por último, se encripta antes de transmitir. Después de ser transmitida la información ésta llega a un set top box que convertirá los datos digitales en la señal analógica inicial.

Una ventaja es el manejo de QoS para garantizar niveles de audio y video adecuados, esto es importante en parámetros como el retardo al cambiar un canal, la disponibilidad del canal o el fallo en el cambio de canal. En la Figura 2.18 se muestra el esquema que sigue el sistema IPTV para el servicio integrado *Triple Play*.





**Figura 2.18:** Esquema IPTV para el servicio integrado *Triple Play* [31]

Existen algunos parámetros del servicio IPTV que permiten analizar la calidad de la señal, algunos puntos importantes son:

- **Jitter:** Es la variación de tiempo de llegada de los paquetes originada por una desincronización en la red, por la gestión de administración, o por las diferentes rutas que siguen los paquetes para llegar a su receptor.
- **Retardo extremo a extremo:** Es la suma de las latencias temporales en una red, extremo a extremo, está formado por el retardo de propagación y de transmisión de los paquetes.
- **Pérdida de paquetes:** Existen algunas razones que ocasionan pérdida de paquetes, entre ellas está la congestión en la red, la limitación en el ancho de banda, errores de transmisión y el error en los enlaces.

En el siguiente cuadro se puede observar según la recomendación de la ITU-T Y.1541 los valores para los parámetros de IPTV, se incluye la clase de calidad de servicio 7 que hace referencia a sistemas IPTV.

Parámetro	Clase 7 QoS
Retardo	400 ms
Jitter	50ms
Probabilidad de pérdida de paquetes	$1 \times 10^{-5}$
Tasa de errores en paquetes recibidos	$1 \times 10^{-6}$
Tasa de fallo en reordenación de paquetes	$1 \times 10^{-6}$

**Tabla 2.4:** Parámetros para servicio IPTV [32]



---

## Formatos de vídeo para IPTV

Entre los códecs implementados en IPTV están MPEG-2, MPEG-4, MPEG-4 versión H.264. MPEG es un grupo de ingenieros expertos en imágenes en movimiento que establecen estándares para codificar audio y video [27].

- **MPEG-2:** Este códec se utiliza para transmitir señales de audio y video codificados. Tiene una relación 50:1 pero mantiene la calidad original siendo una ventaja sobre MPEG-1, para tasas menores a 1 Mbps no se encuentra desarrollado de forma óptima, pero su desempeño se valora en tasas de 3 Mbps o mayores.

- **MPEG-4:** Es un estándar desarrollado por el grupo MPEG, ofrece al usuario mayor interactividad y control de los contenidos multimedia. Los códecs manejados para codificación de audio y video han sido creados para su transmisión en la red IP. Los algoritmos utilizados realizan compresión de la codificación de video y audio lo que permite una mejor codificación, distribución y calidad de almacenamiento.

La tasa de *bits* utilizada es baja y maneja formatos de compresión 8:1 o 12:1 con respecto a MPEG-2, proporcionando la misma calidad de imagen, pero con tasas de 2 Mbps en contraposición con MPEG-2 que es de 3.75Mbps.

- **H.264:** Es un estándar mejorado de MPEG-4 que ofrece una mejor compresión, robustez frente a errores de transmisión y eficiencia en almacenamiento; frente a los códecs anteriores presenta una eficiencia de 2:1 en la codificación. El algoritmo utilizado es de tipo híbrido que permite reducción de correlación, control de tasa de *bits* y predicción por compensación de movimiento de tal forma que mitiga la redundancia.

### 2.2.2.4.c Servicio de Internet

Internet es un medio de comunicación muy extenso que comprende un gran número de servidores, redes y servicios muchos de ellos incompatibles entre sí, manejando diferentes protocolos. Debido a esta diversidad de topologías es necesario crear un conjunto de reglas comunes para la comunicación entre las diferentes redes, por tales motivos se ha creado el protocolo TCP/IP que además provee la comunicación entre redes públicas y privadas.

El protocolo TCP/IP permite la transmisión de datos, en donde el protocolo IP maneja la conmutación de paquetes y TCP permite reorganizar la información en el punto receptor.

El servicio de Internet se refiere a actividades como son la navegación web, descarga de archivos, correo electrónico, compras electrónicas, juegos electrónicos y otras aplicaciones.

#### 2.2.2.5 Requerimientos para el servicio integrado *Triple Play*

En los siguientes subtemas, se analizan los diferentes requisitos para el servicio integrado *Triple Play* en redes IP [33].

- **Requisitos de ancho de banda:** Los servicios de nueva generación *Triple Play* requieren un mayor ancho de banda en comparación con tecnologías existentes como son ADSL.
- **Velocidad de datos y dirección del tráfico simétrica/asimétrica:** Esta puede variar en la dirección *up-stream* (subida) o *down-stream* (bajada). Si un servicio utiliza más/menos capacidad, ya sea en la dirección subida o bajada la conexión se denomina asimétrica (por ejemplo, ver un vídeo que utiliza mayor capacidad de bajada), en cambio cuando los servicios utilizan aproximadamente la misma velocidad tanto para *up-stream* como para *down-stream* (como la petición de una llamada telefónica sobre IP) se denomina simétrica.
- **Tráfico punto-punto, punto-multipunto, multipunto-multipunto:** Los servicios pueden comunicar información exclusivamente a un usuario (punto a punto) como en el vídeo bajo demanda (específicamente solicitada por una persona), otros servicios pueden comunicar información a múltiples usuarios (Punto-Multipunto).

Con estos parámetros se plantea que 15Mbps sea una cantidad adecuada para disfrutar de los servicios *Triple Play* [24]. De esa conexión para el servicio de voz se destinará aproximadamente 70 Kbps. Para la conexión a Internet se presenta un rango de acuerdo al plan que oferte el proveedor que puede oscilar entre 512 Kbps hasta 6 Mbps.

El servicio para IPTV será el que necesite del mayor ancho de banda en el cual

según el equipo utilizado se puede necesitar 7-8 Mbps cuando se trata de canales HDTV (High definition) y cuando es un equipo de menor calidad de imagen SDTV (Standard definition) se necesitará de 1-2 Mbps.

El ancho de banda también dependerá de los códecs que se utilicen para la compresión de los diferentes servicios en el caso de VoIP se utiliza el códec G.729 y para el servicio de IPTV se basa en el códec MPEG-4.

Servicio	IPTV		Datos	VoIP	Total
1 canal HDTV + 1 canal SDTV	8Mbps	+	2 Mbps	0.07 Mbps	12.07 Mbps
	2Mpps				
1 canal HDTV + 2 canales SDTV	8Mbps	+	2 Mbps	0.07 Mbps	14.07 Mbps
	4Mpps				
2 canales SDTV	2Mbps	+	2 Mbps	0.07 Mbps	6.07 Mbps
	2Mpps				

**Tabla 2.5.** Requerimientos de ancho de banda para servicio *Triple Play* para diferentes planes

#### 2.2.2.6 QoS para el servicio integrado *Triple Play*

QoS es un concepto que permite compensar el requerimiento entre diferentes servicios. Para lograr este objetivo, es necesario tener prioridades individuales en los servicios los mismos forman la denominada clase de servicio. La idea de QoS es asignar una prioridad a los requisitos de los servicios relacionados a un grupo de aplicaciones o usuarios con el fin de equiparar las características del servicio [34].

En una plataforma de transporte IP, hay un número de parámetros que influyen en la calidad del servicio. En relación con los servicios de *Triple Play*, estos parámetros son:

- **Retardo de extremo a extremo:** Es la duración del tiempo en segundos desde el instante en que un paquete sale del nodo de origen hasta que se recibe en el nodo de destino. Esta métrica se puede calcular de la siguiente manera como se indica en [25]:

$$d_{total} = Q(d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}) \quad (1.1)$$

Dónde: (Q) es el número de elementos de red (*routers, switches, firewalls*) entre el emisor y el receptor, **dproc** es el retardo de procesamiento en un elemento de red

dado, **dqueue** es el retardo de cola en los elementos de red dada, **dtrans** es el tiempo de transmisión de un paquete en un enlace dado y **dprop** es el retardo de propagación a través de un enlace de red dado.

- **Jitter:** Se define como la variación de retardo entre paquetes consecutivos. De dos paquetes consecutivos se coloca en el nodo de origen las marcas de tiempo  $t_1$  y  $t_2$  y estos paquetes llegan al destino en el tiempo  $t_3$  y  $t_4$  después de volver a montarlos, a continuación, la fluctuación de fase está representada por la siguiente ecuación como se indica en [25]:

$$Jitter = (t_4 - t_3) - (t_2 - t_1) \quad (1.2)$$

Dónde:  $(t_4 - t_3)$  es el tiempo de recepción de paquetes esperado y  $(t_2 - t_1)$  es el tiempo real de recepción de paquetes. *Jitter* negativo significa que los paquetes se recibieron en diferente intervalo de tiempo  $(t_4 - t_3) < (t_2 - t_1)$ .

- **Throughput:** Se define como la carga de tráfico neta que fluye a través de un sistema. Se puede medir en *bytes/seg* (Bps) o *bits/seg* (bps). Para el contenido CBR, el caudal es constante y puede ser calculado como se indica en [25]:

$$R_{min} = \frac{(\text{tamaño paquetes bytes})(\text{numero de paquetes por seg})(8 \frac{\text{bit}}{\text{bytes}})}{\text{second}} \quad (1.3)$$

Sin embargo, con un codificador de velocidad de *bits* variable, la carga de tráfico es de naturaleza dinámica. En consecuencia, las cargas de tráfico VBR son típicamente expresadas en rangos de rendimiento.

- **Tiempo de respuesta HTTP:** El tiempo de respuesta HTTP es el tiempo transcurrido entre el envío de la petición HTTP al servidor HTTP y recepción con la respuesta completa de toda la página web y sus contenidos.

### 2.2.2.7 Ventajas y Desventajas del Servicio *Triple Play*

Entre las ventajas se pueden enunciar:

---

- Los proveedores pueden manejar una única infraestructura, además la red mantiene escalabilidad, seguridad y ahorro de ancho de banda.

- Los usuarios pueden contratar los servicios a una misma empresa lo que garantiza una misma facturación. También podrán tener una mayor interacción con los servicios especialmente el de la televisión en el cual podrán elegir entre las opciones que les brinde su proveedor de servicios.

Entre las desventajas se puede enunciar:

- Los proveedores deben manejar redundancia en la red ya que al manejar una misma infraestructura se debe maximizar la seguridad.

- En el lado de los usuarios se centra en los problemas técnicos que puedan sufrir los servicios contratados si la red sufre algún fallo, esto implicaría la caída simultánea de los servicios contratados.

## **CAPITULO 3**

---

### **PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LA RED NÚCLEO**

---

### 3.1 Análisis y selección del *software* de simulación

Un simulador de red es un *software* que permite realizar el diseño, la implementación y el monitoreo de una red de comunicación, esta herramienta analiza el comportamiento de la red reflejado en el desempeño y la calidad del sistema, de esta forma se puede predecir el funcionamiento y los posibles eventos que pueden afectar al sistema.

Un simulador es una herramienta que permite probar diferentes escenarios evitando de esta manera el costo de armar la red real como medio de prueba [35].

La aparición de *softwares* de simulación nace debido a la necesidad de analizar sistemas de red complejos, en los cuales se pueda modelar entornos de red ya sea en tiempo continuo o tiempo discreto.

Un simulador en tiempo discreto permite cambiar los sistemas de red a lo largo de un tiempo dado, según los valores que tengan las diferentes variables utilizadas en la simulación, por tanto, según el tiempo dado de simulación las variables que caracterizan al sistema cambian y se evalúa ese comportamiento.

En cambio, los simuladores en tiempo continuo avanzan en el tiempo siguiendo la configuración inicial de sus variables en este se analiza si se produce algún cambio, en caso de que alguna variable cambie se procederá a modificarla.

Para evaluar las diferentes herramientas de simulación y poder escoger la más adecuada según sea el caso de estudio se sigue una serie de parámetros de comparación que permitirán trazar una guía de selección. De esta forma el usuario puede tener una ayuda para elegir la herramienta adecuada según sean sus requerimientos [35].

#### 3.1.1 Criterios analizados para la elección del *software* de simulación

La diversidad de *softwares* de simulación de redes en el mercado obliga establecer algunos criterios que se deben tomar en cuenta al momento de seleccionar una herramienta, dentro de la valoración de *software* y de su calidad se toman en cuenta algunas medidas [35]:

- **Confiabilidad:** Garantiza que el *software* tiene el respaldo necesario para poder ser utilizado en el análisis de los diferentes sistemas y que los resultados son confiables y válidos dentro de los conceptos teóricos.
- **Eficiencia:** Es la capacidad que tiene el *software* en cuanto al rendimiento de la simulación es decir el soporte adecuado a los diferentes sistemas y la complejidad que estos conllevan.
- **Portabilidad:** Se refiere a la capacidad de soporte del *software* desde una plataforma hacia otra con diferente *software* o sistema operativo.
- **Mantenimiento:** Analiza la posibilidad de modificar o realizar adaptaciones al sistema simulado.
- **Uso:** Analiza que la herramienta permite desarrollar la simulación de forma adecuada, brinda información respecto a las diferentes configuraciones, además evalúa el uso de estas herramientas en el campo investigativo lo que se constata en las diferentes publicaciones e información que se encuentra en Internet.
- **Funcionalidad:** Se refiere a la capacidad que tiene la herramienta en cuanto a tecnologías, protocolos, equipos de red y el soporte que brinde a las mismas.

Mediante estas características se analiza un método de evaluación-selección, en el cual se plantea evaluar a cada atributo sujeto a análisis el nivel de relevancia que represente en cada simulador analizado, esta evaluación abarca las siguientes medidas:

- **Alto:** Cuando el proceso analizado se cumpla de forma completa y óptima y no contempla restricciones.
- **Medio:** Cuando se contempla algunas restricciones, pero el funcionamiento resulta adecuado y permite análisis.
- **Bajo:** Cuando las restricciones no permiten o no tienen implementado algún parámetro necesario en la simulación, esto está sujeto no solo a limitación del



*software* sino a la licencia que pueda tener el *software*, debido a que hay *softwares* que presentan versiones libres o versiones de licencia que son más completos.

### 3.1.2 Parámetros analizados para la elección del *software* de simulación

Los parámetros analizados para la selección del *software* de simulación se basarán en las siguientes electivas:

#### 3.1.2.1 Investigación

Evalúa el uso de las herramientas de simulación en áreas investigativas y relacionadas con el tema investigado: simular una red MPLS para servicios *Triple Play*, se resalta un primer acercamiento hacia implementaciones de esta área.

Los niveles de elección se basan en:

**Alto:** Indica que la herramienta ha sido empleada en investigaciones relacionadas con el tema de investigación planteado en la tesis y que cuentan con un aval científico además de formar parte de proyectos de investigación.

**Medio:** Indica que la herramienta ha sido utilizada de forma regular en proyectos investigativos, pero presentan restricciones ya sea de funcionamiento o de adquisición de derechos.

**Bajo:** Indica que la herramienta no ha sido utilizada en el tema de investigación por lo general debido a las limitaciones o la restricción por el licenciamiento.

#### 3.1.2.2 Licenciamiento

Según sea el tipo de licencia que tenga el *software* se puede tener acceso a diferentes capacidades, ya sea a todas las funcionalidades o solo a un grupo restringido. También se hace un análisis de costo beneficio de la licencia en caso de ser requerida la compra. La base para analizar este punto se categoriza de la siguiente manera:

**Libre:** El *software* libre se analiza como una herramienta que no necesariamente es gratuita sino más bien es una herramienta que permite al usuario la posibilidad de editar, copiar, ejecutar o distribuir el *software* con la finalidad de mejorarlo o de ampliar su campo de aplicación.

**Empresarial:** Son las licencias que tienen un costo, por lo tanto, existe restricciones para el usuario debido a que la comercialización, costo, libertad y duración de utilización es administrado por la entidad dueña de la herramienta.

### 3.1.2.3 Nivel de Aprendizaje

Este parámetro establece el nivel de complejidad que tendrá la herramienta, esto se relaciona con el nivel de conocimiento que se debe tener para poder manejarla de forma adecuada, vincula los siguientes aspectos:

**Alto:** Se refiere a las herramientas en las cuales para un correcto desempeño es necesario un conocimiento sólido tanto en redes como en programación, en redes debido a que es el objeto de estudio; y, programación porque los dispositivos necesitan de código fuente para su funcionamiento o modificación, además que se puede interactuar con *softwares* externos de programación.

**Medio:** En este caso las herramientas no necesitan de un complejo conocimiento en redes y programación, más bien se centra en la interacción con el usuario mediante la configuración por comandos de consola de una topología de red.

**Bajo:** En este punto se detalla que las herramientas tienen un nivel de tipo didáctico, óptimas para el inicio dentro del mundo de la configuración de redes, en la cual la configuración de diferentes topologías se hace de manera intuitiva por parte del usuario.

### 3.1.2.4 Plataforma Gráfica

Esto se refiere a la interacción entre el usuario y la herramienta dado las facilidades que presta el *software* para su utilización. Los rangos analizados son los siguientes:

**Alto:** Este se refiere a que se necesita un nivel de programación bajo dentro del *software* ya que la herramienta permite trabajar con interfaz gráfica para la realización de las diferentes configuraciones.

**Medio:** La herramienta utiliza interfaz gráfica de forma limitada, como forma de facilitar el uso del *software*, sin embargo, algunas de las implementaciones se deben definir mediante programación.

**Bajo:** En este nivel la herramienta no cuenta con una interfaz gráfica para el usuario o ésta es compleja, en este caso será necesario de programación para implementar cada módulo dentro de la configuración.

### 3.1.2.5 Sistemas Operativos Soportados

Esta característica hace referencia a los diferentes tipos de sistemas operativos que pueden soportar el *software*, hoy en día existen algunos sistemas operativos que son soportados por los diferentes equipos o PC entre ellos se detallan: Windows, Linux, Mac Os, Solaris.

### 3.1.2.6 Redes y Protocolos

Las diferentes tecnologías y protocolos soportados se analizan dentro de la capa del modelo OSI, sobre todo en las primeras capas del modelo como es la capa 1 física, la capa 2 enlace de datos, la capa 3 red.

Si la herramienta no soporta algún protocolo o tecnología ésta tiene que ser programada o modificada en base a un módulo existente, según el soporte que tenga el *software* se podrá analizar los diferentes rangos:

**Alto:** La herramienta soporta una amplia gama de protocolos, tecnologías, estándares de red, esto implica que el *software* tiene diferentes módulos que tienen la arquitectura para soportar los diferentes requerimientos, por lo tanto, brinda una simulación real de la red.

**Medio:** La herramienta no puede soportar una amplia gama de protocolos, tecnologías, estándares de red, debido a que no soportan algunos módulos que tengan la arquitectura adecuada para implementar redes o a su vez es necesario programar o modificar la programación de un módulo para obtener el protocolo, tecnología o estándar necesario.

**Bajo:** Son aquellas herramientas de *software* que no tienen los módulos adecuados para ciertos protocolos, tecnologías, estándares de red, esto puede ser porque el *software* no tenga desarrollado los módulos o por qué se necesita adquirirlos de forma separada.

### 3.1.2.7 Análisis Resultados

Los *softwares* de simulación de redes permiten analizar los resultados de las configuraciones simuladas de tal forma que estos sean los más cercanos al escenario real.

Una de las formas de analizar los resultados después de la simulación de una red es mediante gráficos, esta característica permite interpretar de mejor manera el comportamiento de una red con lo que se puede plantear correcciones o hacer proyecciones de acuerdo a las necesidades del problema que se estudie. Los rangos analizados para este parámetro varían de acuerdo a cuán potente sea la herramienta entre los niveles están:

**Alto:** La herramienta tiene sus propios módulos para la graficación de los resultados, estos gráficos se pueden analizar ya sea en el mismo *software* o pueden ser exportados a *softwares* especializados. Además, presentan diferentes opciones estadísticas para las gráficas.

**Medio:** Las herramientas de *software* generan diferentes datos sujetos a análisis, pero necesitan de herramientas externas para poder presentar los resultados de forma clara (legible) ante el usuario.

**Bajo:** Las herramientas no tiene ningún módulo que permite realizar gráficas dentro de las simulaciones soportadas, los datos que arrojen serán representados por lo general en archivos de texto.

### 3.1.2.8 Generación de Tráfico

Es uno de los parámetros más importantes porque permite saber qué tipo de aplicaciones o servicios puede soportar la herramienta, dado que mientras mayor sea la gama de tráfico que soporte el *software* mejor serán los resultados en la simulación.

El tráfico es una medida estadística entendiéndose como el porcentaje de utilización de una red, una herramienta de simulación debe generar mediante diferentes algoritmos el escenario adecuado. Dentro de los niveles de análisis se tienen los siguientes:

**Alto:** Las herramientas pueden soportar o generar diferentes aplicaciones de tráfico utilizando diferentes parámetros estadísticos que permiten la fiabilidad de los

datos, además cuentan con analizadores de tráfico para realizar los diferentes análisis dentro de la red y permite que el usuario pueda configurar sus propios parámetros de tráfico.

**Medio:** Las herramientas pueden soportar o generar tráfico de aplicaciones básicas, no soporta inyección de tráfico por parte del usuario y maneja métodos estadísticos para el análisis del mismo.

**Bajo:** Las herramientas no permiten soportar tráfico estadístico lo que impide el posterior análisis de los resultados debido a que el *software* no contiene los módulos necesarios para soportar cargas complejas.

### 3.1.3 Análisis de *Softwares* de simulación

Después de definir los diferentes parámetros que permitirán la elección de una herramienta de simulación, se procede a analizar diferentes *softwares* con el objetivo de realizar un cuadro comparativo en cuanto a las ventajas y desventajas que tienen estas herramientas para posteriormente escoger el *software* que se adapte mejor a los requerimientos del tema en estudio.

Según diferentes investigaciones relacionadas con el tema [35], se analizarán los siguientes simuladores de red:

#### 3.1.3.1 *Software* NS2

Es una herramienta de simulación de código abierto, se encuentra entre los más confiables y los más utilizadas dentro de los proyectos relacionados a redes [36]. Existen investigaciones que demuestran el alto porcentaje de uso de este *software*, esto debido a la gran accesibilidad que presenta a los usuarios, no solo por el hecho de ser libre sino porque abarca una alta gama de características.

El código fuente de los diferentes módulos se encuentran disponibles y pueden ser modificados, así como utilizados por todos los usuarios, gracias a esto se han formado diferentes grupos que promueven la programación de diferentes módulos que puedan soportar diferentes protocolos o tecnologías todo con el objetivo de hacer a la herramienta cada vez más robusta.

NS2 cuenta con dos niveles diferentes de simulación [36], el primero se basa en la programación orientada a objetos en donde se utiliza herramientas de red existentes para crear diferentes protocolos esto sin la necesidad de modificar el NS2, el segundo es mediante programación en lenguaje C que se utiliza cuando los módulos no existen, lo que conduce a que el *software* debe ser actualizado con las nuevas herramientas.

El conocimiento para realizar las simulaciones debe de ser elevado, de otra forma no se podría manejar el *software* de forma adecuada. Por lo que es necesario tener una preparación previa para poder manejar la herramienta, la curva de aprendizaje en NS2 es alta.

Dentro de las características gráficas NS2 presenta restricciones, pues está orientado a la programación, sin embargo, dado la capacidad del *software* se ha planteado simulaciones gráficas que consisten en trazar las rutas que siguen los paquetes dentro de la red simulada mediante la herramienta NAM [36].

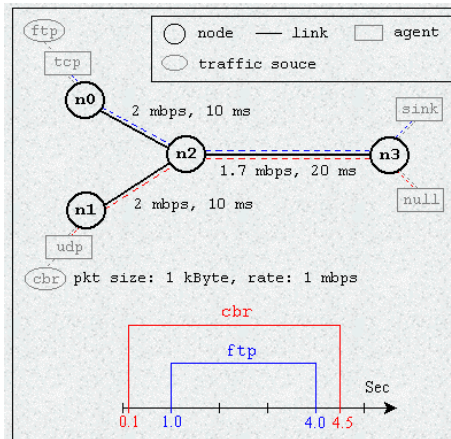
En la página oficial del *software* se muestra una simulación de ejemplo de las prestaciones que tiene NS2, como se observa en las Figuras no cuenta con una alta calidad y capacidad gráfica, el ejemplo es un código que cuenta con el código y el escenario descrito por el código.

```
1 #Se crea el objeto simulador
2 set ns [new Simulator]
3
4 #Para mostrar el flujo de datos en colores diferentes en NAM
5 $ns color 1 Blue
6 $ns color 2 Red
7
8 #Archivo NAM
9 set nf [open out.nam w]
10 $ns namtrace-all $nf
11
12 #Definir procedimiento
13 proc finish {} {
14     global ns nf
15     $ns flush-trace
16     #Close the NAM trace file
17     close $nf
18     #Execute NAM on the trace file
19     exec nam out.nam &
20     exit 0
21 }
22
23 #Se crean los nodos
24 set n0 [$ns node]
25 set n1 [$ns node]
26 set n2 [$ns node]
27 set n3 [$ns node]
```

**Figura 3.1:** Fragmento de código en NS2 [36]

A pesar de que NS2 no tiene una buena interfaz gráfica se puede utilizar *softwares* externos de esta manera se aprovecha la capacidad del *software*. Entre las herramientas que puede simular el NS2 están:

- TCP/IP, FTP, RTP, UDP, GPRS, IPv6, IPv4, RSVP, MPLS,
- También puede soportar redes tipo Ad Hoc, Wireless, WLAN, UMTS.



**Figura 3.2:** Escenario simulación NS2 [36]

Por último, ofrece soporte para diferentes sistemas operativos: Linux, Solaris Windows, Mac OS.

### 3.1.3.2 Software NS3

Es una herramienta de simulación de red que prioriza su funcionamiento en las capas 2 y 4 del modelo OSI, su principal uso es de carácter educativo e investigativo. NS3 es de código libre, presenta características de escalabilidad además funciona como emulador [37].

NS3 está basado en C++ y Python, soportando solo este tipo de programación lo que limita la depuración y modificación del código a un conocimiento amplio en programación en C++. Ofrece soporte para diferentes sistemas operativos: Linux, Solaris, Windows.

Posee una interfaz gráfica capaz de soportar la carga de la simulación o parte de ella, de igual manera se puede analizar con *softwares* externos como es NAM. La interfaz gráfica permite observar la configuración de la red.

NS3 proporciona objetos de soporte para recoger datos a lo largo de la simulación, esta característica es parecida a la característica de NS2. También tiene herramientas que permiten analizar los resultados con histogramas, funciones de distribución, gráficas a lo largo del tiempo.

Dentro de las tecnologías que abarca soporta simulaciones en IPv4, IPv6 además de redes wireless como wifi o wimax, está orientado a redes móviles.

```

1  print "Crea nodos"
2  terminals = ns.network.NodeContainer()
3  terminals.Create(5)
4
5  csmaSwitch = ns.network.NodeContainer()
6  csmaSwitch.Create(1)
7
8  csmaSwitch2 = ns.network.NodeContainer()
9  csmaSwitch2.Create(1)
10
11 print "Construye la topologia"
12 csma = ns.csma.CsmaHelper()
13 csma.SetChannelAttribute("DataRate", ns.network.DataRateValue(ns.network.
14 csma.SetChannelAttribute("Delay", ns.core.TimeValue(ns.core.MilliSeconds(
15
16 # Crea los links de cada terminal al switch
17 terminalDevices = ns.network.NetDeviceContainer()
18 switchDevices = ns.network.NetDeviceContainer()
19 switchDevices2 = ns.network.NetDeviceContainer()
20

```

Figura 3.3: Fragmento de código en NS3 [37]

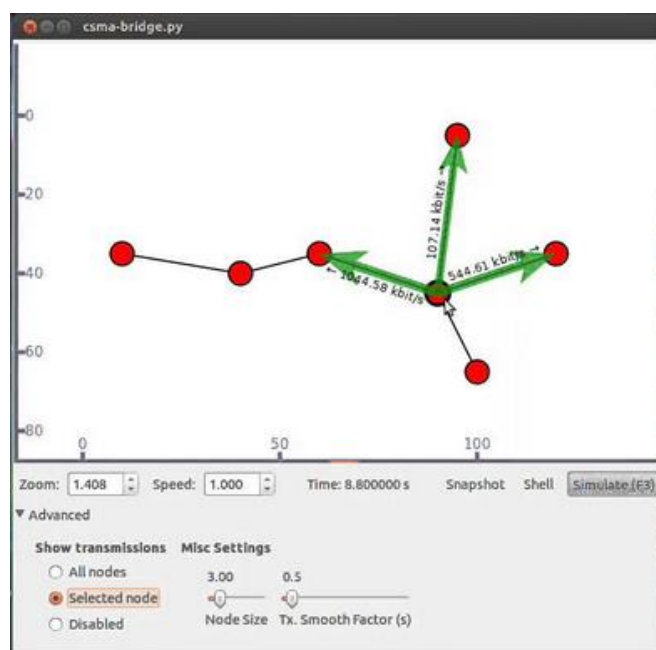


Figura 3.4: Escenario simulación NS3 [37]

### 3.1.3.3 Software GNS3

Es un emulador gráfico que sirve para simular redes complejas, el cual permite cargar el IOS (Internetwork Operating System) completo de cada uno de los equipos que se usan en la simulación. La herramienta no tiene limitantes al momento de realizar las configuraciones, soporta todo lo que puede soportar el equipo real. Por su grado de



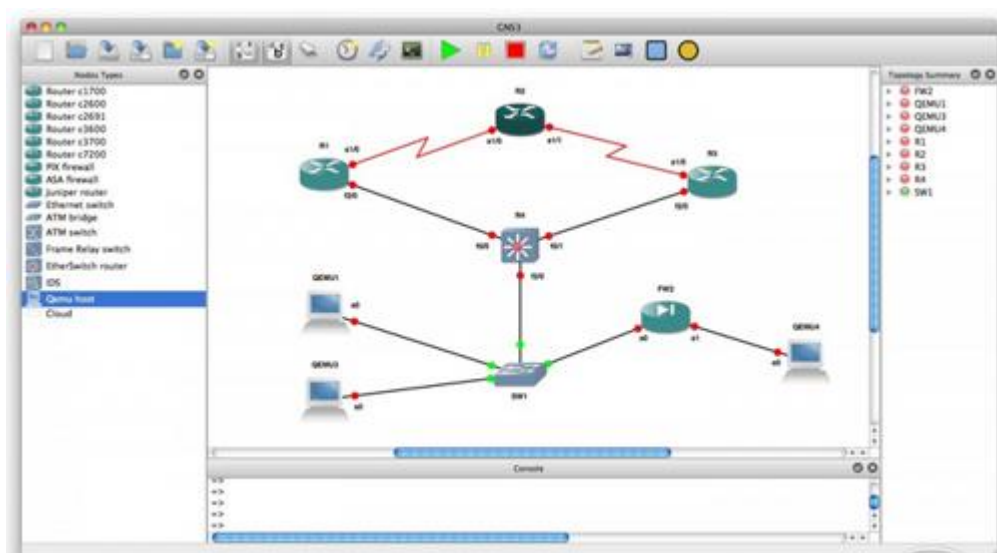
realismo es excelente para hacer todas las pruebas necesarias previas a la implementación.

Por el hecho de ser un emulador, GNS3 consume demasiados recursos del CPU, lo cual podría ser solucionado usando más de un computador, este *software* es de libre distribución.

Tiene un soporte gráfico amplio, su funcionamiento tiene características similares con emuladores como Virtual Box o VMWare. Ofrece soporte para diferentes sistemas operativos: Linux, Mac, Windows.

La interfaz gráfica tiene muchas prestaciones y es interactiva con el usuario. La licencia de GNS3 es de versión libre, pero es necesario tener el IOS de los dispositivos para poder realizar la emulación de la red, estos IOS se pueden adquirir solamente con el fabricante del equipo [38].

Dentro de las configuraciones que soporta se encuentran protocolos como: RIP, OSPF, BGP, también soporta configuraciones MPLS usando enrutadores Cisco.



**Figura 3.5:** Interfaz Gráfica GNS3 [39]

#### 3.1.3.4 Software OMNET++

Al igual que NS2 y NS3, este *software* es una herramienta de simulación discreta, uno de los motivos para la implementación de OMNET++ fue el aporte que iba a brindar en el área de investigación además de ser de tipo libre, esto permite tener a

esta herramienta como opción para su utilización frente a otras de tipo comercial, se puede correr la herramienta en sistemas como Microsoft Visual C++. Ofrece soporte para diferentes sistemas operativos: Linux, Mac, Windows [40].

La estructura de esta herramienta se basa en módulos que tiene el código escrito en C++, los módulos se comunican con otros módulos por medio de mensajes, en donde se crea una jerarquía en base a módulos simples y módulos compuestos que son la unión de dos o más módulos simples.

Si bien esta herramienta presenta muchas ventajas no tiene desarrollado muchos módulos referentes a tecnologías y protocolos de redes por lo que se tiene que programar ya sea a partir de módulos existentes o crear módulos nuevos que puedan soportar las tecnologías o protocolos necesarios y que aún no estén dentro de las configuraciones del *software*, con estas características la curva de aprendizaje para esta herramienta es alta debido a que se necesita un vasto conocimiento de programación y redes.

Un punto fuerte de esta herramienta es la interfaz gráfica ofreciendo mayores prestaciones que otros *softwares*, en las simulaciones OMNET++ permite observar la simulación en línea es decir a medida que corre la configuración se puede pausar para analizar o modificar los valores en la red además se puede modificar los nodos y los datos que se obtienen como resultados y estos a su vez pueden ser analizados vía WEB pues OMNET brinda soporte.

OMNET soporta diferentes tecnologías como MPLS, NAT, VPN, diferentes protocolos de enrutamiento, diferentes enlaces y equipos de red lo que brinda varias opciones para realizar las simulaciones. Ver Figura 3.6.

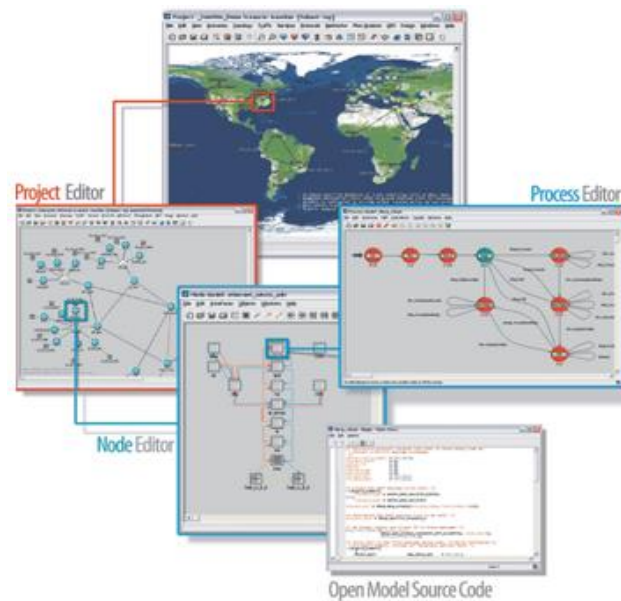
### 3.1.3.5 *Software* OPNET MODELER

Es un lenguaje de simulación orientado a las comunicaciones. Proporciona acceso directo al código fuente, permite modelar y verificar el comportamiento de una red bajo condiciones especificadas en cuanto a la carga. OPNET tiene una versión gratuita académica IT Gurú además de una licencia de usuario para la versión completa Modeler.



Prevé el funcionamiento de la red ante escenarios futuros como: crecimiento de tráfico, fallos en la red, entre otros. Desde el 2012 OPNET pasó a ser parte de Riverbed y el *software* se distribuye como Riverbed Modeler. Ofrece soporte para diferentes sistemas operativos: Linux, Windows.

ANGÉLICA CABRERA IDROVO  
DAVID FARFÁN GUILLÉN



**Figura 3.7: OPNET MODELER [42]**

Estos dominios están basados en C++ y puede ser modificado, es un *software* mundialmente utilizado en campos investigativos ya que la interfaz es amigable con el usuario, a pesar de esto la curva de aprendizaje es alta pues se necesita tener un conocimiento amplio en el tema de redes y programación.

Para comprender la forma en la que OPNET estructura los diferentes módulos que soporta se necesita conocimientos en programación basada en objetos, pues los módulos están desarrollados en C++ además ésta herramienta permite vincularse con *softwares* como MATLAB por lo que el conocimiento sobre este es también requerido.

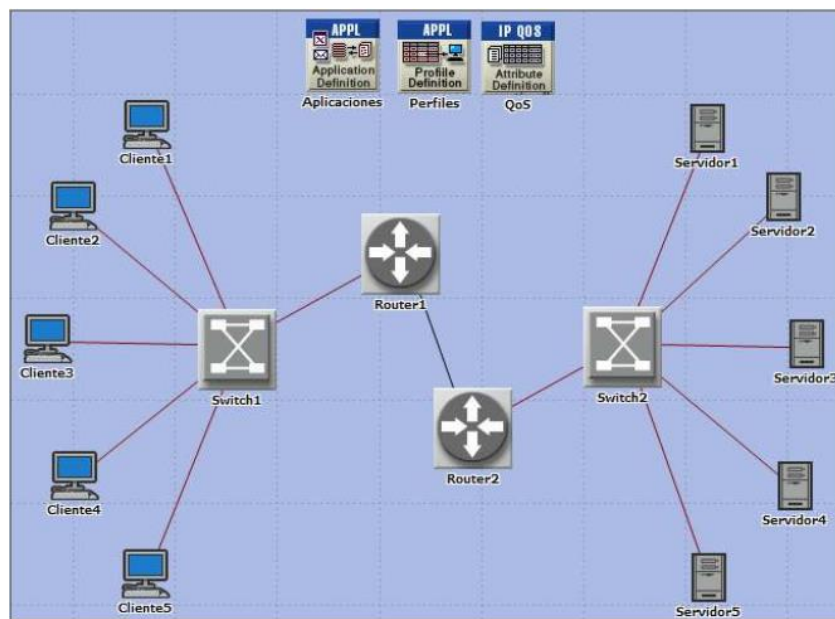
OPNET puede ser compilado en Microsoft Visual Studio, en el caso de las nuevas versiones con el nombre de Riverbed el mismo *software* soporta la compilación esto hace que sea un poco más lento [43].

En el caso de la licencia su costo es alto, pero existe la opción de la versión académica cuando se realiza investigaciones que Riverbed facilita por 6 meses.

Una característica importante es el análisis de los resultados en las simulaciones, OPNET maneja grafos que permiten analizar los resultados, estos se presentan en cuadros denominados paneles de análisis, estas gráficas pueden ser analizadas de varias formas con diferentes métodos estadísticos. Los gráficos son bidimensionales en donde se contrapone el eje x-y los cuales analizan diferentes variables por lo general el eje x muestra el tiempo y en el eje y la variable que es analizada [43].

Es una herramienta muy utilizada también en la teoría de colas pues permite simular los diferentes algoritmos como FIFO, PQ, WFQ, así como también es importante su utilización en sistemas móviles e inalámbricos. [44].

En cuanto al tráfico que permite simular existen una gran variedad relacionado con voz, video y datos lo que proporciona una herramienta adecuada para la evaluación de este tipo de servicios.



**Figura 3.8:** Interfaz OPNET MODELER [44]

### 3.1.4 Selección del *software* de simulación

En el proyecto de tesis, se ha analizado los diferentes parámetros necesarios para la elección de la herramienta de simulación, la herramienta que se necesita debe ser un *software* que sea capaz de soportar diferentes herramientas y que estas puedan ser modificadas, es importante que pueda soportar diferentes tipos de tráfico y que estos puedan ser analizados de forma entendible.

Por estas razones es fundamental conocer los pros y contras de los *softwares* más utilizados en el contexto de redes para según las características que ofrezca cada uno escoger el que se adapte de mejor manera a los objetivos planteados.

En la tabla siguiente se expone una comparativa entre los distintos *softwares* estudiados en el punto anterior lo que permitirá basado en los parámetros expuestos

en el análisis escoger una herramienta de simulación que permita solucionar el problema planteado.

Al ser de carácter educativo el caso de investigación se priorizará las herramientas que no tengan costo alguno (licencia comercial) o que a su vez pueda ser utilizado por el tiempo de desarrollo del tema de tesis. En el caso de herramientas con licencia libre es importante conocer el campo de utilización que han tenido resolviendo problemas similares esto se observa en las diferentes investigaciones existentes.

La herramienta debe tener un uso extenso en el área que se está investigando dado que, si cuenta con los módulos necesarios para la simulación, permitirá el desarrollo óptimo del caso de estudio.

Otro punto importante es que el caso de estudio necesita de una herramienta que permita analizar los resultados de forma precisa ya que con esto se puede comprobar el cumplimiento de los objetivos.

Con estas condiciones relevantes se expone una tabla comparativa entre los diferentes *softwares* de simulación de redes:

<i>Software</i>	<i>OPNET</i>	<i>OMNET</i>	<i>GNS3</i>	<i>NS2</i>	<i>NS3</i>
<b>Características</b>					
<b>Investigación</b>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>
<b>Licenciamiento</b>	<i>Comercial/Versión Prueba Libre</i>	<i>Libre</i>	<i>Libre/Comercial</i>	<i>Libre</i>	<i>Libre</i>
<b>Nivel de Aprendizaje</b>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>
<b>Plataforma Gráfica</b>	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>
<b>Sistemas Operativos Soportados</b>	<i>Windows, Unix</i>	<i>Windows, Unix</i>	<i>Windows, Linux, Mac</i>	<i>Windows, Unix, Mac</i>	<i>Windows, Unix, Mac</i>
<b>Redes y Protocolos</b>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>
<b>Análisis Resultados (gráficas)</b>	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	<i>Bajo</i>	<i>No tiene</i>	<i>Medio</i>
<b>Generación de Tráfico</b>	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Medio</i>

**Tabla 3.1:** Comparación *software* de simulación

Al observar estas características se detalla que el *software* que presta mejores valoraciones según los parámetros analizados es OPNET.

OPNET presenta un alto uso investigativo además de ofrecer una versión educativa del simulador lo que permite su instalación en sistemas operativos como Windows.

Si bien la curva de aprendizaje es alta el grado de alcance del *software* es adecuado y presenta respaldo para los diferentes protocolos, equipos o redes que serán necesarios en la simulación del proyecto, además que tiene una gran variedad de variables a simular y soporta una interfaz gráfica con altas prestaciones. Por lo tanto, la elección de OPNET en su versión estudiantil permitirá desarrollar las diferentes topologías del esquema de red planteado.

### **3.2 Identificación de requerimientos para el servicio integrado *Triple Play***

En las redes de nueva generación un gran número de aplicaciones puede ser diseñada y suministrada a través de una red convergente, estas aplicaciones se han visto potenciadas como servicios *Triple Play* que abarca la integración de servicios tales como Internet, voz y televisión.

Estos servicios comparten una misma infraestructura mediante la capa IP, la misma que permite empaquetar la información, para realizar el empaquetamiento cada uno de estos servicios manejan diferentes restricciones de ancho de banda.

En la siguiente sección se procede a definir los requerimientos necesarios para plantear los servicios de VoIP, IPTV e Internet, dentro de estos requerimientos el ancho de banda es importante pues es el que determina que la red tenga calidad de servicio con los usuarios, para esto se utilizan diferentes códecs de audio y video que permitirán transmitir la información por la red.

#### **3.2.1 Requerimientos en VoIP**

En redes de voz es importante considerar la correcta planificación en cuanto a la capacidad de la red, esto hace referencia al ancho de banda como factor importante en el diseño, de tal manera que permita obtener una señal de calidad.



Para poder transmitir la voz se debe codificar, los dispositivos de codificación se denominan códecs (codificador/decodificador). En el proceso de escoger un códec para la transmisión de voz sobre IP se tiene que conocer que cada códec presenta diferentes características como son: tasa *bits*, calidad resultante del audio, retardo, tecnología utilizada. Los códecs han sido designados para reproducir voz en la banda de 300 Hz a 3.4 KHz [27]. En la siguiente tabla se exponen características de los códecs:

Códec	Nombre	Bit Rate (kbps)	Retardo (ms)	Comentarios
<b>G.711</b>	PCM Modulación por pulsos codificados	64, 56	0.125	Códec base
<b>G.723.1</b>	Hybrid MPC-MLQ and ACELP	6.3, 5.3	37.5	Utilizado VoIP
<b>G.728</b>	LD-CELP: Low-Delay code excited linear prediction	40, 16, 12.8, 9.6	1.25	Aplicaciones digitales
<b>G.729</b>	CS-ACELP: Conjugate Structure Algebraic Codebook Excited Linear Prediction	11.8, 8, 6.4	15	Utilizado VoIP
<b>G.723</b>	Sub-band ADPCM	48,56,64	3	Utilizado VoIP
<b>G.723.1</b>	Transform Coder	24,32	40	Audio y videoconferencia
<b>G.711.1</b>	Banda Ancha G.711	64, 80, 96	11.875	Usado VoIP
<b>G.729.1</b>	Banda Ancha G.711	8 a 32	menor a 49	Usado VoIP

**Tabla 3.2:** Características Códecs Voz [27]

Para la transmisión de voz codificada es necesario armar paquetes, un canal de voz es un flujo de *bits* relacionados con el códec utilizado. Cada códec utilizado tiene una tasa de datos, que consiste en la tasa de muestreo y la resolución de cada muestra.

Para armar los paquetes IP se necesita analizar algunas condiciones pues si se toma cada muestra de voz como un paquete se corre el riesgo de generar una sobrecarga en el sistema de red, en otro caso se puede unir algunas muestras de voz y empaquetarlas, sin embargo, corre el riesgo de generar retardos no aceptables para mantener la calidad de la señal.

Un paquete IP puede consistir en 1500 *bytes* de información [27]. Dentro de los estudios se ha estipulado escoger ventanas de datos de duración de 10 a 30 ms para con estos formar los paquetes.



Existen protocolos que permiten el transporte sobre las redes entre estos está el RTP.

### 3.2.1.1 RTP Protocolo de Transporte en Tiempo Real

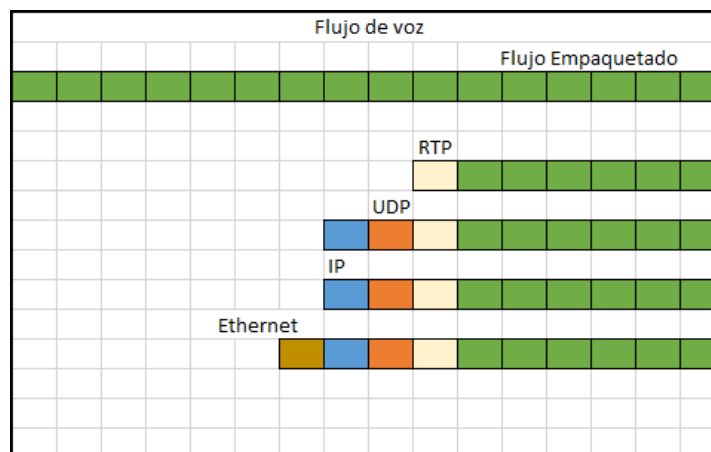
Está basado en el RFC 3550 [45] es un protocolo que garantiza transporte sobre redes que no garanticen calidad de servicios como es el caso de los servicios de voz y video.

RTP establece la forma de crear los paquetes además de la forma de transmitirlos en tiempo real. Normalmente se utiliza este protocolo para transmitir aplicaciones de red no confiables como es UDP.

Cada muestra de voz (también abarca video) codificada es encapsulada en paquetes RTP esto a su vez es encapsulado en paquetes UDP. La transferencia se puede hacer a múltiples destinos lo que es conocido como *multicast*.

En la siguiente imagen se observa el flujo de voz muestreada, a este flujo se le selecciona el codificador a utilizar, después se le añade la cabecera RTP, seguido de la cabecera UDP.

Después se empaqueta en la capa IP que es el medio indicado para el servicio de voz y por último el encapsulamiento en Ethernet que es el medio físico para ser transmitido los paquetes. A este paquete se le aumenta la carga útil que es variable para cada códec, con estos parámetros se puede transmitir un paquete de voz sobre ip a través de la red.



**Figura 3.9:** Empaquetamiento flujo de voz

### 3.2.1.2 RTCP Protocolo de Control de RTP

En el RFC 3605 se establece un protocolo de control de RTP que se encarga de enviar paquetes de control entre los usuarios de una sesión, entre las funciones importantes se encuentran [46]:

- Proveer información acerca de la calidad de los datos, esto permite corregir errores de codificación además de mitigar la degradación de la señal.
- Permite asociar diferentes flujos con el mismo origen, como son flujos de audio y video con el mismo emisor.
- Adaptar la frecuencia a la que se envía los paquetes de control RTP según el número de usuarios en la sesión establecida.

### 3.2.1.3 Ancho de banda para VoIP

El ancho de banda necesario dependerá de la cantidad de datos que se envía por paquete, como se expuso anteriormente para formar un paquete de VoIP se necesita de diferentes encabezados:

*Tamaño total del paquete* = Encabezado Ethernet + Encabezado IP/UDP/RTP + tamaño de carga útil de voz.

El encabezado de *IP+UDP+RTP* es de 40 bytes en donde *IP* (20 bytes) en *UDP* (8 bytes) y en *RTP* (12 bytes), el encabezado de ethernet es de 18 bytes [29], estos encabezados son de tamaño fijo pues están estandarizados, el tamaño variable es el de la carga útil, este dependerá de cada códec el cual variará según la tasa de datos, tamaño de flujo de datos, de la opinión de calidad (MOS) y de los paquetes por segundo que enviará [29].

En la siguiente tabla se expondrá las características de los diferentes códecs analizados, así como el ancho de banda utilizado. Los cálculos correspondientes a cada códec se realizarán en el apartado siguiente.

Información de Códec					Cálculos de Ancho de Banda			
Velocidad de bits del códec (kbps)	Ejemplo de tamaño del códec (bytes)	Ejemplo de intervalo del códec (ms)	Mean Opinion Score (MOS)	Tamaño de la carga útil de voz (bytes)	Tamaño de la carga útil de voz (ms)	Paquetes por segundo (PPS)	Ancho de banda c/cRTP MP o FRF.12 (kbps)	Ancho de banda Ethernet (kbps)
G.711 (64 kbps)	80	10	4,1	160	20	50	67.6	87.2
G.729 (8 kbps)	10	10	3,92	20	20	50	11.6	31.2
G.723.1(6.4 kbps)	24	30	3,9	24	30	34	8.8	22.3
G.723.1 (5.3 kbps)	20	30	3,8	20	30	34	7.7	21.2
G.726 (32 kbps)	20	5	3,85	80	20	50	35.6	55.2
G.726 (24 kbps)	15	5		60	20	50	27.6	47.2
G.728 (16 kbps)	10	5	3,61	60	30	34	18.4	32

**Tabla 3.3:** Códecs para VoIP [29]

### 3.2.1.4 Análisis de parámetros para VoIP

#### 3.2.1.4.a Velocidad de *bits* del códec

Depende del códec como se muestra en la Tabla 3.3, este parámetro se refiere al número de *bits* necesarios para transmitir una llamada de voz en un segundo, se calcula mediante la ecuación dada en [29]:

$$\text{Velocidad de bits del códec} = \frac{\text{Ejemplo del tamaño del códec}}{\text{ejemplo del intervalo del códec}} \quad (3.1)$$

#### 3.2.1.4.b Parámetros para el cálculo de ancho de banda para los códecs analizados

Para el cálculo del ancho de banda de cada uno de los códecs analizados en las Tablas 3.2 y 3.3 se tiene que analizar diferentes parámetros entre los cuales cuentan:

**Tamaño del códec (mseg):** Esto depende del códec y de los algoritmos que utilice, este parámetro hace referencia al intervalo en tiempo del códec capturado en *bytes* por el procesador digital de señales.

**Tamaño del códec (bytes):** Esto depende del códec y de los algoritmos que utilice, este parámetro hace referencia al número de *bytes* capturados por el procesador digital de señales en cada códec.

**Mean Opinion Score (MOS):** MOS es un sistema que clasifica la calidad de las llamadas de voz, el sistema se basa en la encuesta a un grupo de clientes que escuchan una llamada y califican la calidad en un intervalo de 1-5, en donde 1 es calidad mala y 5 es calidad buena, estos resultados son promediados para armar la valoración para cada códec.

**Tamaño de la carga útil de voz (bytes):** Este punto hace referencia al número de *bytes* que rellenan el paquete con flujos de voz, el tamaño de la carga útil debe ser múltiplo del tamaño del códec.

**Tamaño de la carga útil de voz (ms):** Este punto hace referencia al número de *bytes* que rellenan el paquete con flujos de voz, representado en milisegundos.

**Paquetes por segundo (PPS):** Representa el número de paquetes que es necesario transmitir por segundo enviando a la velocidad de *bits* del códec. Para cada códec el número de paquetes por segundo varía según la fórmula expresada en [29]:

$$\text{PPS} = \frac{\text{Tasa datos (Kbps)}}{\text{Carga útil de paquete de voz (bits)}} \quad (3.2)$$

**Ancho de banda Ethernet (kbps):** Con estos parámetros se puede calcular el ancho de banda que necesita cada códec para ser transmitido por Ethernet, este es un protocolo de capa de enlace de datos mundialmente utilizado para transmisión de datos. Para la fórmula se tiene la siguiente ecuación como se muestra en [29]:

$$\text{Ancho de Banda} = \text{Tamaño total del paquete} \times \text{PPS} \quad (3.3)$$

$$\text{Tamaño total del paquete} = \text{Encabezado Ethernet} + \text{Encabezado IP/UDP/RTP} + \text{tamaño de carga útil de voz} \quad (3.4)$$

**Ancho de banda c/cRTP (kbps):** cRTP es una técnica de compresión que permite reducir el encabezado de IP+UDP+RTP de 40 *bytes* a 2-4 *bytes*, con esto el ancho de banda necesario para tráfico de voz será menor, esto optimiza a la aplicación de VoIP dado que la calidad de voz se mantiene alta y el ancho de banda necesario para transmitir los paquetes de voz disminuye.

### 3.2.1.4.c Cálculo de ancho de banda para los códecs analizados

Para el cálculo del ancho de banda se realizará las operaciones expuestas en las fórmulas (3.1), (3.2), (3.3) y (3.4):

#### **Cálculo velocidad de bits de códec**

**Códec G.711:** Tamaño del códec (80 *bytes*) / tamaño del intervalo (10 ms), la velocidad se calcula en Kbps por lo tanto se necesita que el tamaño del códec esté en *bits* y el intervalo del códec en seg para esto se multiplica por 8 *bits* para transformar de *bytes* a *bits* y se divide para 1000 el tamaño del intervalo para transformar de milisegundos a segundos.

$$\text{Tamaño del códec} = 80\text{bytes} * 8\text{bits} = \mathbf{640\text{bits}}$$

$$\text{Tamaño del intervalo} = \frac{10\text{ ms}}{1000\text{ ms}} = \mathbf{0.01\text{ seg}}$$

$$\text{Velocidad de bits del códec} = \frac{640\text{ bits}}{0.01\text{ seg}} = 64\text{ Kbps}$$

**Códec G.729:** Tamaño del códec (10 *bytes*) / tamaño del intervalo (10ms), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$\text{Velocidad de bits del códec} = \frac{80\text{ bits}}{0.01\text{ seg}} = 8\text{ Kbps}$$

**Códec G.723:** Tamaño del códec (24 *bytes*) / tamaño del intervalo (30ms), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$\text{Velocidad de bits del códec} = \frac{192 \text{ bits}}{0.03 \text{ seg}} = 6,4 \text{ Kbps}$$

**Códec G.723:** Tamaño del códec (20 *bytes*) / tamaño del intervalo (30ms), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$\text{Velocidad de bits del códec} = \frac{160 \text{ bits}}{0.03 \text{ seg}} = 5,3 \text{ Kbps}$$

**Códec G.726:** Tamaño del códec (20 *bytes*) / tamaño del intervalo (5ms), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$\text{Velocidad de bits del códec} = \frac{160 \text{ bits}}{0.005 \text{ seg}} = 32 \text{ Kbps}$$

**Códec G.726:** tamaño del códec (15 *bytes*) / tamaño del intervalo (5ms), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$\text{Velocidad de bits del códec} = \frac{120 \text{ bits}}{0.005 \text{ seg}} = 24 \text{ Kbps}$$

**Códec G.728:** tamaño del códec (10 *bytes*) / tamaño del intervalo (5ms), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$\text{Velocidad de bits del códec} = \frac{80 \text{ bits}}{0.005 \text{ seg}} = 16 \text{ Kbps}$$

### ***Cálculo de PPS (paquetes por segundo).***

**Códec G.711:** Tasa datos (64 Kbps) /Carga útil de paquete de voz (160 *bytes*), la carga útil de voz se calcula en *bits* para esto se multiplica por 8 *bits* para transformar de *bytes* a *bits*.

Carga útil de paquete de voz:  $160 * 8 \text{ bits} = 1280 \text{ bits}$

$$PPS = \frac{64 \text{ Kbps}}{1280 \text{ bits}} = 50 \text{ PPS}$$

**Códec G.729:** Tasa datos (8 Kbps) /Carga útil de paquete de voz (20 bytes), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$PPS = \frac{8 \text{ Kbps}}{160 \text{ bits}} = 50 \text{ PPS}$$

**Códec G.723.1:** Tasa datos (6.4 Kbps) /Carga útil de paquete de voz (24 bytes), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$PPS = \frac{6,4 \text{ Kbps}}{192 \text{ bits}} = 34 \text{ PPS}$$

**Códec G.723.1:** Tasa datos (5.3 Kbps) /Carga útil de paquete de voz (20 bytes), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$PPS = \frac{5,3 \text{ Kbps}}{160 \text{ bits}} = 34 \text{ PPS}$$

**Códec G.726:** Tasa datos (32 Kbps) /Carga útil de paquete de voz (80 bytes), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$PPS = \frac{32 \text{ Kbps}}{640 \text{ bits}} = 50 \text{ PPS}$$

**Códec G.726:** Tasa datos (24 Kbps) /Carga útil de paquete de voz (60 bytes), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$PPS = \frac{24 \text{ Kbps}}{480 \text{ bits}} = 50 \text{ PPS}$$

**Códec G.728:** Tasa datos (16 Kbps) /Carga útil de paquete de voz (60 *bytes*), al igual que el primer caso transformamos los valores.

$$PPS = \frac{16 \text{ Kbps}}{480 \text{ bits}} = 34 \text{ PPS}$$

#### ***Cálculo de ancho de banda***

##### **Códec G.711:**

Tamaño total del paquete = 18 *bytes* + 40 *bytes* + 160 *bytes* = 218 *bytes*

Tamaño total del paquete = 218 *bytes* \* 8 = **1744 bits**

***Ancho de Banda*** = 1744 *bits* \* 50PPS = **87.2 Kbps**

##### **Códec G.729:**

Tamaño total del paquete = 18 *bytes* + 40 *bytes* + 20 *bytes* = 78 *bytes*

***Ancho de Banda*** = 624 *bits* \* 50PPS = **22.3 Kbps**

##### **Códec G.723.1:**

Tamaño total del paquete = 18 *bytes* + 40 *bytes* + 24 *bytes* = 82 *bytes*

***Ancho de Banda*** = 656 *bits* \* 34PPS = **22.3 Kbps**

##### **Códec G.723.1:**

Tamaño total del paquete = 18 *bytes* + 40 *bytes* + 20 *bytes* = 78 *bytes*

***Ancho de Banda*** = 624 *bits* \* 34PPS = **21.2 Kbps**



**Códec G.726:**

Tamaño total del paquete = 18 *bytes* + 40 *bytes* + 80 *bytes* = 138 *bytes*

$$\text{Ancho de Banda} = 1104 \text{ bits} * 50\text{PPS} = 55.2 \text{ Kbps}$$

**Códec G.726:**

Tamaño total del paquete = 18 *bytes* + 40 *bytes* + 60 *bytes* = 118 *bytes*

$$\text{Ancho de Banda} = 944 \text{ bits} * 50\text{PPS} = 47.2 \text{ Kbps}$$

**Códec G.728:**

Tamaño total del paquete = 18 *bytes* + 40 *bytes* + 60 *bytes* = 118 *bytes*

$$\text{Ancho de Banda} = 944 \text{ bits} * 34\text{PPS} = 32 \text{ Kbps}$$

Después de realizar estos cálculos se puede determinar qué códecs presentan las mejores prestaciones en cuanto al ancho de banda, según las características expuestas el retardo de los códecs seleccionados tienen valores aceptados para mantener la calidad de la señal.

Se han seleccionado 2 códecs, en ambos casos se maneja una buena calidad de la señal y un ancho de banda razonable. Estos parámetros servirán para calcular el tráfico que soportará la red punto que se abarcará en los siguientes apartados del capítulo.

<i>Códec a utilizar</i>	<i>Velocidad Códec</i>
<b>G729 (8kbps)</b>	31.2 Kbps
<b>G723.1 (6.3 kbps)</b>	21.9 Kbps

**Tabla 3.4:** Códecs de voz seleccionados para el servicio de VoIP

### 3.2.2 Requerimientos en IPTV

IPTV es un servicio nuevo como se definió en la sección correspondiente del capítulo anterior, por lo tanto, el análisis del mismo no solo se planteará en el cálculo del ancho de banda necesario para garantizar el servicio sino se estructurará algunas características necesarias para que IPTV pueda implementarse de forma óptima.

#### 3.2.2.1 Características IPTV

Una verdadera televisión IP (IPTV1) [27], brindará un nuevo servicio audiovisual en el que los suscriptores disfrutarán de la posibilidad de controlar cuándo y dónde recibir o descargar programas y videos. Uno de los requerimientos de IPTV es manejar un modelo bidireccional de televisión digital en donde cada canal se transmite individualmente en paquetes IP a los suscriptores que previamente lo han solicitado. El reto de desplegar servicios audiovisuales es un proceso que se logra tras cumplir adecuadamente algunos pasos [27]:

1. *Definir el modelo de negocio.* El análisis del mercado y de los competidores permite determinar parámetros clave como son cargos por servicio y el tamaño del mercado, así como también plantear diferenciadores de servicio.
2. *Diseño arquitectónico.* Definir el número de nodos y recursos que se requieren en cada red.
3. *Definición de servicio.* Esto debe ser descrito en términos de tamaño de imagen, codificador y decodificador, formatos de marco estándar y perfiles de video.
4. *Operación de la red.* El despliegue de la infraestructura requiere de la verificación del correcto desempeño y rendimiento de la red que permitirá establecer rutas, y definir nodos *multicast* que controlarán el encaminamiento y la gestión de la calidad.
5. *Prestación de servicios.* Los servidores de vídeo y equipos del abonado deben estar conectados y se debe comprobar el rendimiento de extremo a extremo y la capacidad de la red para ofrecer servicios de video diferenciados en condiciones de tráfico real.
6. *Garantía de servicio.* El servicio ofertado puede verse afectado por una serie de cuestiones que modificaría las condiciones iniciales de calidad. Es necesario identificar y solucionar los problemas de una mala calidad de vídeo que afecten a los clientes.

### 3.2.2.2 Características para determinar el ancho de banda para IPTV

Para determinar el ancho de banda necesario para brindar el servicio de IPTV se debe analizar algunos aspectos técnicos:

**Caracterización de la Imagen:** Definir la calidad del vídeo en términos de número de píxeles y fotogramas por segundo.

**Codificadores y decodificadores:** Existen varias alternativas para comprimir y codificar audio y video entre ellos se incluye la familia MPEG. Los estándares son importantes existen algunos como MPEG-1 que son menos eficientes. Otros, tales como MPEG2, tienen un buen rendimiento, pero son sustituidos progresivamente por estándares como MPEG-4.

**Número de abonados:** IPTV requiere una infraestructura costosa y, por lo tanto, la densidad de los usuarios es un criterio en la planificación de nuevas implementaciones.

**Patrones de tráfico:** El conocimiento de los patrones de tráfico se puede utilizar para modificar dinámicamente la topología de la red, además de la reasignación de recursos para adaptar la red a las condiciones del tráfico. La monitorización continua ayudará a descubrir picos de tráfico reiterados de forma diaria o semanal. Tráfico *unicast*, vídeo bajo demanda y aplicaciones personales, están distribuidos a través del tiempo, pero también se analiza el tráfico *multicast* que sigue patrones más impredecibles.

### 3.2.2.3 Códecs de Audio y Vídeo

El diseño de una red que soporte IPTV necesita garantizar un ancho de banda fijo para que la señal se transmita en tiempo real, para esto se manejan diferentes códecs de audio y video.

Hay una serie de códecs (codificador-decodificador) para señales audiovisuales que definen la codificación, la compresión y la transmisión de los contenidos audiovisuales, Entre ellos se destacan como se revisó en el capítulo 2: MPEG-2 y MPEG-4 versión H264 [27].

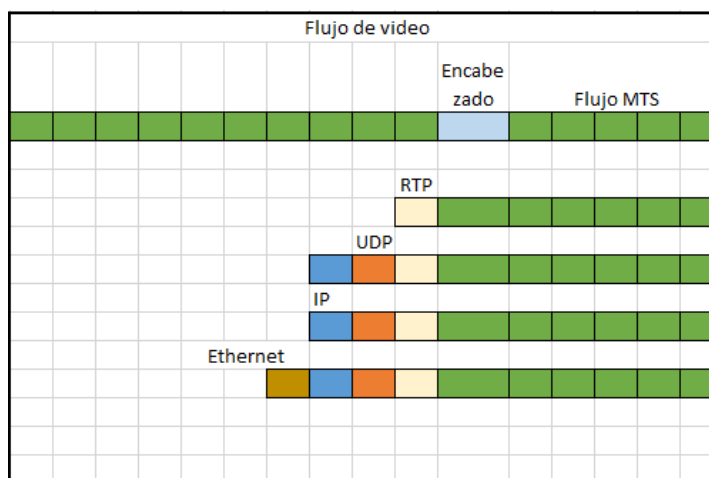
En IPTV se maneja la información en paquetes IP, estos paquetes son estandarizados en unidades de hasta 8 Kbytes de datos a los cuales se les denomina PES (Empaquetamiento de secuencias de datos), estos a su vez son empaquetados en tramas de 184 bytes, sumado 4 bytes de encabezado se conforma 188 bytes denominados MTS (MPEG Transporte Secuencia).

En las redes IP al igual que para VoIP se tiene que el video se maneja a través de los protocolos RTP y RTCP.

Característica	MPEG-1	MPEG-2	MPEG-4	H.264/MPEG-4
Tamaño del macro-bloque	16x16	16x16,16x8	16x16	16x16
Tamaño del bloque	8x8	8x8	16x16, 8x8	8x8, 16x8, 8x16, 16x16, 4x8, 8x4
Transformada	DCT	DCT	DCT	DCT
Tamaño de la muestra	8x8	8x8	8x8	4x4
Codificación	VLC	VLC	VLC	VLC
Tipo de cuadros	I, P, B, D	I, P, B	I, P, B	I, P, B, SI, SP
Ancho de Banda	Menor 1.5 Mbps	2 a 15 Mbps	64 kbps a 2 Mbps	64 Kbps a 150Mbps

**Tabla 3.5:** Códecs para IPTV [27]

Para el caso de MPEG-2 varios paquetes MTS pueden transportarse a través de un único paquete RTP, son 7 paquetes MTS con 188 bytes de contenido esto se detalla en el RFC 3016, de los 188 bytes, 4 corresponden al encabezado y los 184 corresponde a la carga útil que están codificados con MPEG-2.



**Figura 3.10:** Empaquetado Flujos con códecs MPEG

Por lo tanto, en códec MPEG-2 se tiene:

- 184 *bytes*.
- 40 *bytes* (IP+UDP+RTP).
- 4 *bytes* encabezado.
- 22 *bytes* encabezado ethernet.

Como se manejan 7 paquetes por cada paquete RTP se tiene:

$7 \times 184 = 1288$  *bytes* de contenido MPEG-2.

$40 + 4 \times 7 = 68$  *bytes* de encabezado en capa 3.

22 *bytes* encabezado capa 2.

**Carga total:**  $1288 + 68 + 22 = 1378$  *bytes*.

*En el caso de MPEG-4:* Se puede enviar hasta 1430 *bytes* de carga útil, más encabezado IP+UDP+RTP que suman 40 *bytes*, aquí no se incluyen los 4 *bytes* de encabezado. Además, se agrega los *bytes* de ethernet de capa 2 que son 22 *bytes*.

Para sistemas IPTV se tiene primero que codificar la información mediante un códec como es el caso de MPEG, después se empaqueta en un paquete RTP, después en un paquete UDP y por último en un paquete IP.

El ancho de banda necesario para una aplicación de audio y video mediante una red IP variará según el tipo de codificación, según el tamaño de la pantalla, según la cuantización seleccionada y según el movimiento y textura en la imagen. Sumado al ancho de banda de la señal se le aumenta el ancho de banda que generará la sobrecarga de los paquetes IP, UDP, RTP además de la cabecera del medio de transporte como por ejemplo ethernet.

El ancho de banda para aplicaciones como la televisión no es fijo como en el caso de voz, en el cual mediante un códec se puede calcular de forma exacta el canal necesario para la transmisión de la información, en televisión por IP se maneja una codificación estadística en donde la misma depende de la imagen transmitida por lo tanto el ancho de banda establecido es aproximado.

Dentro de IPTV se definen dos tipos de canales, el uno basado en dispositivos estándares denominado SDTV (definición estándar de TV) y otro basado en alta calidad

de imagen y video denominado HDTV (alta definición de TV) cada uno necesita de diferente ancho de banda dada la calidad que cada uno maneja, la codificación digital de un programa de TV de alta resolución genera una 20 Mbit/s mientras que para una resolución estándar se genera alrededor de 6 Mbit/s. Esto se puede reducir significativamente con algoritmos de compresión como por ejemplo MPEG. En la siguiente tabla se muestra las características para los canales que se ofertará en IPTV [27]:

	Lines	Pixels	Broadcast	MPEG-2	MPEG-4
SDTV	480	704 x480	6 Mbit/s	3.5 Mbit/s	2–3.2 Mbit/s
HDTV	1080	1920 x1080	19.2 Mbit/s	15 Mbit/s	7.5-13 Mbit/s

**Tabla 3.6:** Características de los canales para el servicio de IPTV [27]

Analizando la Tabla 3.6 se utilizará el ancho de banda promedio para el códec utilizado. Para los canales de SDTV se brindará un ancho de banda de 2 Mbps y en el caso de HDTV será de 8 Mbps manejando una compresión por códec MPEG-4 versión 10, estos anchos de banda se repartirán para un canal ya sea de versión estándar o de versión de alta calidad.

### 3.2.3 Requerimiento de Internet

Para el servicio de datos se ha tomado la información de la empresa pública ETAPA EP la cual brinda servicio de banda ancha en la ciudad de Cuenca [51], para este servicio se ofertan diferentes paquetes con diferentes tasas de transmisión, esto difiere en el ancho de banda, el mismo que ha ido evolucionando según se ha ido mejorando los medios físicos de transmisión, así como los equipos receptores de la señal.

Para conocer el requerimiento necesario para un paquete de datos es necesario saber el uso que se va a tener, dependiendo de las aplicaciones y el tipo de información al que se vaya acceder, así como el número de dispositivos que se planea conectar a la red.

Para aplicaciones en tiempo real como son videos y juegos se necesita un ancho de banda grande a diferencia de si las aplicaciones utilizadas son el correo o bases de datos. Además, se está sujeto a que, si la información es descargada o si es consumida vía *online*. En la actualidad el uso de Internet ha crecido hacia el consumo de vídeo en streaming, en donde la gente opta por utilizar el servicio de datos de forma *online*,

también se ha visto potenciado el consumo de descarga de archivos de diferentes formatos.

Otro de los puntos importantes es que se debe tener un acceso de calidad al Internet dado los servicios que ofrece:

- Acceso a información remota (web).
- Comunicación de persona a persona.
- Entretenimiento interactivo.

Todos estos factores son importantes a la hora de definir el ancho de banda adecuado para navegar en Internet.

Dentro de los planes de datos analizados para este proyecto se maneja la tabla 3.7, la misma está basada en datos recogidos de la empresa ETAPA EP:

### 3.2.3.1 Análisis de los parámetros

**Velocidad de Bajada:** En planes de datos se refiere el término de velocidad de bajada y de subida, esto hace referencia a la información que fluye ya sea del servidor proveedor del servicio hasta el usuario (bajada) o del usuario hasta el servidor proveedor del servicio.

En la velocidad de bajada se incluye todo el consumo del usuario en el Internet que incluye toda la información que ve *online* como juegos, videos, o la información que se descarga del servidor a su dispositivo personal. Esta velocidad por lo general es alta dado el consumo de los usuarios.

**Velocidad de Subida:** Hace referencia a toda la información cargada desde el usuario hacia el servidor, esto incluye la información que se almacena en la nube, o archivos que se suben hacia diferentes páginas de contenido web, por lo general la velocidad es menor que la velocidad de subida dado que la información subida desde el usuario es menor que la información de bajada.

Descripción	Velocidad Bajada (kbps)	Velocidad Subida (kbps)	Compresión
Plan 2.4 megas	2400	1000	8:1
Plan 2.8 megas	2800	1000	8:1
Plan 3.6 megas	3600	1000	8:1
Plan 5.0 megas	5000	1000	8:1
Plan 6.1 megas	6100	1000	8:1
Plan 8 megas	8000	1000	8:1
Plan 10 megas	10000	1000	8:1
Plan 12 megas	12000	1000	8:1

**Tabla 3.7:** Ancho de banda para servicio de datos [51]

### 3.3 Definición de parámetros iniciales

#### 3.3.1 Consideraciones iniciales para el diseño

El éxito de la red y el buen funcionamiento de la misma depende del diseño. La mejor manera de diseñar una red es usar un modelo jerárquico, éste presenta varios beneficios con respecto a un diseño de red plana conmutada. Entre estos beneficios, se encuentran: [47]

- Escalabilidad
- Redundancia
- Rendimiento
- Seguridad
- Facilidad de administración
- Facilidad de mantenimiento

Un diseño jerárquico implica dividir a la red en niveles o capas, cada una de las capas cumple con una función específica dentro del diseño de red. Existen tres capas:

**Capa de acceso:** También conocida como capa de usuario o capa de escritorio. Es la encargada de proporcionar acceso a la red para los grupos de trabajo y los



usuarios. La capa de usuario para una red pequeña generalmente incorpora *switches* de capa 2 y puntos de acceso que proporcionan conectividad entre las estaciones de trabajo y los servidores [47].

**Capa de distribución:** La capa de distribución es el punto medio entre la capa de acceso y los servicios principales de la red. El dispositivo de capa de distribución es el centro en los armarios de cableado. Para segmentar los grupos de trabajo y aislar los problemas de la red en un entorno de campus, se utiliza un *router* o un *switch* multicapa [47].

**Capa de núcleo:** También conocida como “*backbone* de red”. La capa de núcleo consta de dispositivos de red de alta velocidad, los cuales están diseñados para conmutar paquetes lo más rápido posible e interconectar varios componentes como: módulos de distribución, módulos de servicio, el centro de datos y el perímetro de la WAN [47].

La capa de núcleo es fundamental para la interconectividad entre los dispositivos de capa de distribución. El núcleo agrega el tráfico de todos los dispositivos de la capa de distribución, por lo tanto, debe poder enviar grandes cantidades de datos rápidamente.

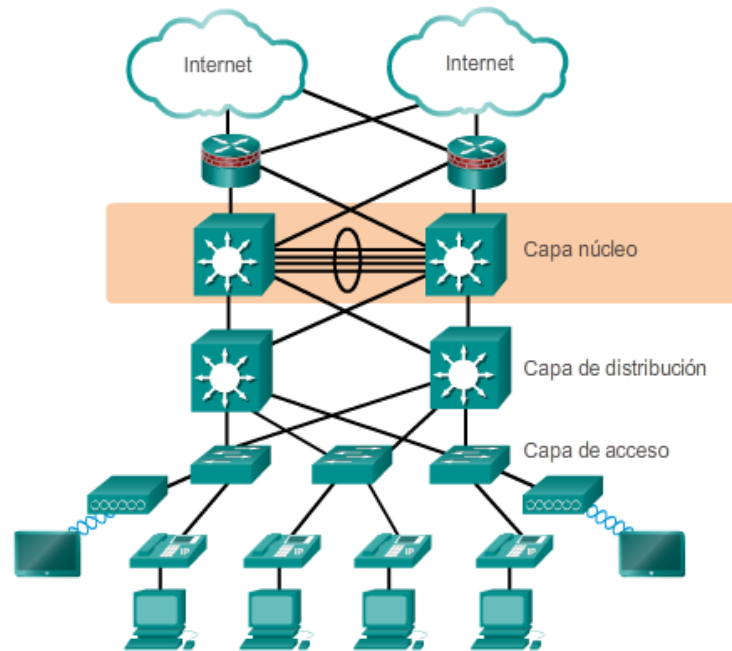
Algunas de las consideraciones en cuanto a la capa de núcleo incluyen lo siguiente:

- Debe proporcionar *switching* de alta velocidad (es decir, un transporte rápido).
- Debe proporcionar confiabilidad y tolerancia a fallas.
- Debe lograr la escalabilidad mediante equipos más rápidos, no con más equipos.
- Debe evitar la manipulación de paquetes que implica una gran exigencia para la CPU a causa de la seguridad, la inspección, la clasificación de la calidad de servicio (QoS) u otros procesos.

Características de los equipos en la capa de núcleo

- Soporte de capa 3
- Tasa de envío muy alta

- Gigabit Ethernet /10
- Componentes redundantes
- Agregado de enlaces
- Calidad de servicios (QoS)



**Figura 3.11:** Estructura de una red jerárquica

**Fuente:** [www.cisco.com](http://www.cisco.com)

### 3.3.2 Introducción

Actualmente los usuarios buscan mejores servicios con menores precios. Para hacer posible este deseo las empresas de telecomunicaciones tienden a mejorar la ingeniería de su red mediante la integración de servicios como: voz, datos y televisión utilizando una misma infraestructura.

Para el dimensionamiento de la red, es necesaria una aproximación del número de posibles usuarios considerando su capacidad económica y el uso que se dará al servicio. Pensando en esto se plantea brindar los servicios individualmente o por paquetes con calidad diferenciada, de ésta manera el cliente puede escoger el paquete que mejor se ajuste a su presupuesto y a sus necesidades.

### 3.3.3 Mercado de clientes y servicios

#### 3.3.3.1 Población actual de la provincia del Azuay

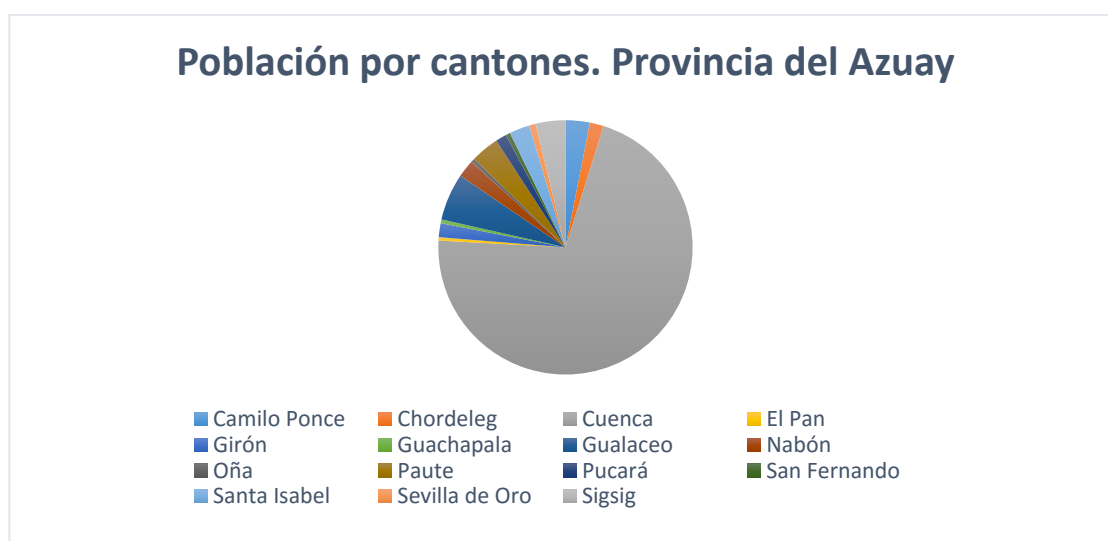
Para determinar el número de posibles usuarios para los servicios de *Triple Play* se considera la población en cada uno de los cantones de la provincia del Azuay; específicamente el número de hogares, ya que los servicios serán brindados por hogar y no por persona. A continuación, se muestra una tabla con el número de habitantes y de hogares por cantón en la provincia del Azuay. Los datos han sido obtenidos de la página del INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). Año 2010 [48].

Nombre del cantón	Total de habitantes en cada cantón	Total de hogares en cada cantón	Promedio de personas por hogar en cada cantón
<b>CUENCA</b>	499.904	133.857	3,73
<b>GIRON</b>	12.492	3.481	3,59
<b>GUALACEO</b>	42.461	10.950	3,88
<b>NABON</b>	15.868	4.143	3,83
<b>PAUTE</b>	25.334	6.890	3,68
<b>PUCARA</b>	10.010	2.477	4,04
<b>SAN FERNANDO</b>	3.984	1.103	3,61
<b>SANTA ISABEL</b>	18.275	4.936	3,70
<b>SIGSIG</b>	26.850	7.138	3,76
<b>OÑA</b>	3.572	1.096	3,26
<b>CHORDELEG</b>	12.552	3.375	3,72
<b>EL PAN</b>	3.035	949	3,20
<b>SEVILLA DE ORO</b>	5.600	1.592	3,52
<b>GUACHAPALA</b>	3.401	965	3,52
<b>CAMILO PONCE ENRIQUEZ</b>	19.853	5.379	3,69
<b>TOTAL</b>	703.191	188.331	

**Tabla 3.8:** Número de habitantes y de hogares en la provincia del Azuay. INEC 2010 [48]

En los datos de la Tabla 3.8 se puede observar que Cuenca es el cantón con mayor población de la provincia del Azuay. Su población es equivalente al 71% de los habitantes de la provincia. Luego están Gualaceo, Sigsig y Paute con un porcentaje del 6 %, 3.78% y 3.58% respectivamente.

Debido a la notoria diferencia poblacional, algunos de los análisis estarán únicamente basados en estudios de mercado realizados en la ciudad de Cuenca.



**Figura 3.12: Población por cantones. INEC 2010**

### 3.3.3.2 Proyección del crecimiento poblacional para la provincia del Azuay hasta el año 2030

A continuación, se presenta en la Tabla 3.9 la proyección del crecimiento poblacional hasta el año 2020 realizada en el año 2010 por la INEC. La proyección del año 2030 fue realizada por el Gobierno Provincial del Azuay. [48] [49]

Cantón	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2030
CUENCA	524.563	535.624	546.864	558.127	569.416	580.706	591.996	603.269	614.539	625.775	636.996	773.107
GIRON	13.192	13.196	13.197	13.195	13.187	13.175	13.157	13.134	13.107	13.074	13.037	13.455
GUALACEO	44.487	44.994	45.501	45.997	46.482	46.954	47.411	47.855	48.286	48.702	49.104	55.517
NABON	16.593	16.686	16.777	16.863	16.943	17.017	17.084	17.145	17.201	17.250	17.292	18.603
PAUTE	26.559	26.853	27.146	27.432	27.712	27.983	28.246	28.500	28.747	28.985	29.214	32.925
PUCARA	10.510	10.533	10.554	10.572	10.586	10.596	10.601	10.603	10.601	10.595	10.584	11.076
SAN FERNANDO	4.177	4.181	4.185	4.187	4.187	4.186	4.183	4.179	4.173	4.165	4.156	4.311
SANTA ISABEL	19.167	19.365	19.563	19.755	19.943	20.124	20.298	20.467	20.630	20.786	20.935	20.348
SIGSIG	28.047	28.326	28.603	28.873	29.134	29.387	29.630	29.864	30.089	30.304	30.509	34.046
OÑA	3.732	3.775	3.818	3.861	3.903	3.943	3.982	4.020	4.057	4.093	4.128	4.676
CHORDELEG	13.074	13.289	13.507	13.723	13.938	14.150	14.360	14.568	14.773	14.976	15.176	17.984
EL PAN	3.179	3.175	3.170	3.164	3.157	3.149	3.140	3.129	3.118	3.105	3.091	3.153
SEVILLA DE ORO	6.130	6.211	6.292	6.372	6.451	6.529	6.604	6.678	6.751	6.821	6.890	7.921
GUACHAPALA	3.553	3.588	3.623	3.656	3.689	3.720	3.750	3.780	3.807	3.834	3.859	4.301
CAMILO PONCE ENRIQUEZ	22.557	23.697	24.895	26.142	27.441	28.793	30.204	31.668	33.191	34.774	36.423	60.701
TOTAL	739.520	753.493	767.695	781.919	796.169	810.412	824.646	838.859	853.070	867.239	881.394	1.062.124

**Tabla 3.9: Proyección del crecimiento poblacional de la provincia del Azuay hasta el año 2020 y 2030. [48] [49]**

En la Tabla 3.10 se muestra la proyección del número de hogares en cada uno de los cantones a partir del año 2016.

### 3.3.4 Mercado de clientes y servicios

#### 3.3.4.1 Proyección de usuarios del servicio de Internet

En la Tabla 3.11, se muestra información estadística del número de personas en el Azuay con acceso al servicio de Internet. Los datos han sido obtenidos de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) con corte en septiembre de 2015 y publicación en noviembre del mismo año. [50]

Cantón	Promedio de personas por hogar	Año 2016	Hogares por cantón 2016	Año 2017	Hogares por cantón 2017	Año 2018	Hogares por cantón 2018	Año 2019	Hogares por cantón 2019	Año 2020	Hogares por cantón 2020	Año 2030	Hogares por cantón 2030
CUENCA	3,73	591.996	158.712	603.269	161.734	614.539	164.756	625.775	167.768	636.996	170.776	773.107	207.267
GIRON	3,59	13.157	3.665	13.134	3.658	13.107	3.651	13.074	3.642	13.037	3.631	13.455	3.748
GUALACEO	3,88	47.411	12.219	47.855	12.334	48.286	12.445	48.702	12.552	49.104	12.656	55.517	14.309
NABON	3,83	17.084	4.461	17.145	4.477	17.201	4.491	17.250	4.504	17.292	4.515	18.603	4.857
PAUTE	3,68	28.246	7.676	28.500	7.745	28.747	7.812	28.985	7.876	29.214	7.939	32.925	8.947
PUCARA SAN FERNANDO	4,04	10.601	2.624	10.603	2.625	10.601	2.624	10.595	2.623	10.584	2.620	11.076	2.742
SANTA ISABEL	3,61	4.183	1.159	4.179	1.158	4.173	1.156	4.165	1.154	4.156	1.151	4.311	1.194
SIGSIG	3,70	20.298	5.486	20.467	5.532	20.630	5.576	20.786	5.618	20.935	5.658	20.348	5.499
OÑA	3,76	29.630	7.880	29.864	7.943	30.089	8.002	30.304	8.060	30.509	8.114	34.046	9.055
CHORDELEG	3,28	3.982	1.221	4.020	1.233	4.057	1.244	4.093	1.256	4.128	1.266	4.676	1.434
EL PAN DE AZÚCAR	3,72	14.360	3.860	14.568	3.916	14.773	3.971	14.976	4.026	15.176	4.080	17.984	4.834
SEVILLA DE ORO	3,20	3.140	981	3.129	978	3.118	974	3.105	970	3.091	966	3.153	985
GUACHAPALA	3,52	6.604	1.876	6.678	1.897	6.751	1.918	6.821	1.938	6.890	1.957	7.921	2.250
CAMILO PONCE ENRIQUEZ	3,52	3.750	1.065	3.780	1.074	3.807	1.082	3.834	1.089	3.859	1.096	4.301	1.222
TOTAL	3,69	30.204	8.185	31.668	8.582	33.191	8.995	34.774	9.424	36.423	9.871	60.701	16.450
		824.646	221.071	838.859	224.884	853.070	228.697	867.239	232.498	881.394	236.296	1.062.124	284.793

**Tabla 3.10:** Proyección del crecimiento de los hogares en la provincia del Azuay hasta el año 2020 y 2030. [48] [49]

Provincia	Cuentas Conmutadas	Cuentas Dedicadas	Cuentas Totales	Estimado de Usuarios Conmutados	Estimado de Usuarios Dedicados	Estimado de usuarios totales	Número de habitantes Septiembre-2015	% de habitantes provincia que acceden a Internet
Azuay	274	95.733	96.007	1.096	333.440	334.536	806.828	41,46%

**Tabla 3.11:** Habitantes de la provincia del Azuay que cuentan con el servicio de Internet. Arcotel. Septiembre 2015 [50].

Las estadísticas mostradas en la Tabla 3.11 corresponden a las cuentas y usuarios del servicio de Internet en la provincia del Azuay. Esto incluye a todos los proveedores.

Para una aproximación con mayor precisión se toma el porcentaje de penetración del servicio de Internet de la principal empresa proveedora de servicios de telecomunicaciones en el cantón Cuenca. (ETAPA EP).

Al ser el cantón Cuenca el cantón con mayor número de habitantes de la provincia del Azuay (71%), para algunos de los análisis se toma en cuenta estudios de mercado realizados únicamente en este cantón. De ésta manera el índice de penetración del servicio de Internet de la empresa pública ETAPA EP en el cantón Cuenca, será considerado para realizar aproximaciones en toda la provincia del Azuay.

En la sección indicadores de la página oficial de la empresa pública ETAPA EP. Se especifica que el número total de conexiones de Internet de banda ancha es de 61255, lo que representa un 64% del número de cuentas dedicadas de la provincia del Azuay. Con ese porcentaje se puede deducir que la empresa pública ETAPA EP cuenta con alrededor de 213402 usuarios, lo que corresponde a un porcentaje de penetración de 26.44%. [51]

### 3.3.4.1.a Demanda inicial del servicio de Internet

Según los datos expuestos en la Tabla 3.10 la población de la provincia del Azuay para el año 2016 es de al menos 824.646 habitantes con 221.071 hogares. Para este estudio se va a tomar en cuenta el porcentaje de penetración del servicio de Internet que tiene la empresa pública ETAPA EP en el cantón Cuenca, el cual tiene un valor de 26.44%.

Cantón	Población Azuay 2016	Hogares por cantón 2016	Aproximación de hogares con Internet. 26.44%
CUENCA	591.996	158.712	41.963
GIRON	13.157	3.665	969
GUALACEO	47.411	12.219	3.231
NABON	17.084	4.461	1.179
PAUTE	28.246	7.676	2.029
PUCARA	10.601	2.624	694
SAN FERNANDO	4.183	1.159	306
SANTA ISABEL	20.298	5.486	1.450
SIGSIG	29.630	7.880	2.084
OÑA	3.982	1.221	323
CHORDELEG	14.360	3.860	1.021
EL PAN	3.140	981	259
SEVILLA DE ORO	6.604	1.876	496
GUACHAPALA	3.750	1.065	282
CAMILO PONCE ENRIQUEZ	30.204	8.185	2.164
TOTAL	824.646	221.071	58.451

**Tabla 3.12:** Suscriptores del servicio de Internet en la provincia del Azuay. Año 2016.

### 3.3.4.1.b Cálculo del ancho de banda inicial para el servicio de Internet

Para el cálculo del ancho de banda del servicio de Internet se considera los planes residenciales ofrecidos por la principal empresa de telecomunicaciones que brinda sus servicios en el cantón Cuenca. Etapa EP.

Según información obtenida de la sección de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TICs), de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de Hogares Urbanos y Rurales (ENIGHUR) realizada en el año 2012, el promedio del gasto mensual de los hogares ecuatorianos en Internet es de 44.26 dólares, lo cual se toma como referencia para obtener el ancho de banda promedio necesario para proveer de Internet a los usuarios de la provincia del Azuay. El plan que más se aproxima a este valor es el número 5 (Plan Residencial 6.1 Megas).

	↓ DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD DE BAJADA [ Kbps ]	VELOCIDAD DE SUBIDA [ Kbps ]	COMPRESIÓN	PRECIO SIN IVA	PRECIO CON IVA
1	PLAN RESIDENCIAL 2.4 MEGAS 8.1	2.400	1.000	8:1	\$ 19,99	\$ 22,39
2	PLAN RESIDENCIAL 2.8 MEGAS 8.1	2.800	1.000	8:1	\$ 22,99	\$ 25,75
3	PLAN RESIDENCIAL 3.6 MEGAS 8.1	3.600	1.000	8:1	\$ 24,99	\$ 27,99
4	PLAN RESIDENCIAL 5 MEGAS 8.1	5000	1.000	8:1	\$ 29,90	\$ 33,49
5	PLAN RESIDENCIAL 6.1 MEGAS 8.1	6100	1.000	8:1	\$ 39,90	\$ 44,69
6	PLAN RESIDENCIAL 8 MEGAS 8.1	8000	1.000	8:1	\$ 46,00	\$ 51,52
7	PLAN RESIDENCIAL 10 MEGAS 8.1	10000	1.000	8:1	\$ 64,00	\$ 71,68
8	PLAN RESIDENCIAL 12 MEGAS 8.1	12000	1.000	8:1	\$ 78,00	\$ 87,36

**Figura 3.13:** Planes del servicio de Internet. ETAPA EP

**Fuente:** [www.etapa.net.ec](http://www.etapa.net.ec)

Para el cálculo de ancho de banda se va a utilizar una compresión de 8 a 1.

Cantón	Año 2016	Hogares por cantón 2016	Aproximación de hogares con Internet. 26.44%	Velocidad de bajada (Mbps)	Ancho de banda por cantón (Mbps)
CUENCA	591.996	158.712	41.963	6,1	31.997
GIRON	13.157	3.665	969	6,1	739
GUALACEO	47.411	12.219	3.231	6,1	2.463
NABON	17.084	4.461	1.179	6,1	899
PAUTE	28.246	7.676	2.030	6,1	1.548
PUCARA	10.601	2.624	694	6,1	529
SAN FERNANDO	4.183	1.159	306	6,1	234
SANTA ISABEL	20.298	5.486	1.450	6,1	1.106
SIGSIG	29.630	7.880	2.083	6,1	1.589
OÑA	3.982	1.221	323	6,1	246



<b>CHORDELEG</b>	14.360	3.860	1.021	6,1	778
<b>EL PAN</b>	3.140	981	259	6,1	198
<b>SEVILLA DE ORO</b>	6.604	1.876	496	6,1	378
<b>GUACHAPALA</b>	3.750	1.065	282	6,1	215
<b>CAMILO PONCE ENRIQUEZ</b>	30.204	8.185	2.164	6,1	1.650
<b>TOTAL</b>	824.646	221.071	58.451		44.569

**Tabla 3.13:** Ancho de banda requerido para brindar el servicio de Internet a la provincia del Azuay. Año 2016.

### 3.3.4.1.c Proyección del crecimiento de usuarios y ancho de banda del servicio de Internet para el año 2020

La siguiente tabla muestra los usuarios proyectados según la tasa de crecimiento poblacional para la provincia del Azuay en un tiempo de 4 años, esto debido a que los fabricantes de los equipos de conmutación mencionan que, a partir de este tiempo los conmutadores podrían necesitar reemplazo de algunas piezas de hardware. [52]

Para obtener la aproximación de las familias que contarán con el servicio de Internet fijo en la provincia del Azuay en el año 2020 se ha tomado en cuenta el índice de penetración de dicho servicio a nivel nacional en el año 2010 que según datos de ARCOTEL corresponde a un valor de 24.77%, mientras que, en el 2015 el índice ha ascendido a un valor de 61.85%. Considerando un crecimiento completamente lineal, es decir, sin tomar en cuenta aspectos económicos o sociales, se estima que para el año 2020 el índice de penetración crezca en un 37%. Tomando como porcentaje actual de penetración el 26.44% correspondiente a la empresa pública ETAPA EP. Se estima que para el año 2020 el porcentaje será de 56.10%.

<b>Cantón</b>	<b>Promedio de personas por hogar</b>	<b>Año 2020</b>	<b>Hogares por cantón 2020</b>	<b>Aproximación de hogares con Internet. 56.10%</b>	<b>Velocidad de bajada (Mbps)</b>	<b>Ancho de banda por cantón. (Mbps)</b>
<b>CUENCA</b>	3,73	636.996	170.776	95.805	6,1	73.052
<b>GIRON</b>	3,59	13.037	3.631	2.037	6,1	1.553
<b>GUALACEO</b>	3,88	49.104	12.656	7.100	6,1	5.414
<b>NABON</b>	3,83	17.292	4.515	2.533	6,1	1.931
<b>PAUTE</b>	3,68	29.214	7.939	4.454	6,1	3.396
<b>PUCARA</b>	4,04	10.584	2.620	1.470	6,1	1.121
<b>SAN FERNANDO</b>	3,61	4.156	1.151	646	6,1	492
<b>SANTA ISABEL</b>	3,7	20.935	5.658	3.174	6,1	2.420

<b>SIGSIG</b>	3,76	30.509	8.114	4.552	6,1	3.471
<b>OÑA</b>	3,26	4.128	1.266	710	6,1	542
<b>CHORDELEG</b>	3,72	15.176	4.080	2.289	6,1	1.745
<b>EL PAN</b>	3,2	3.091	966	542	6,1	413
<b>SEVILLA DE ORO</b>	3,52	6.890	1.957	1.098	6,1	837
<b>GUACHAPALA</b>	3,52	3.859	1.096	615	6,1	469
<b>CAMILO PONCE ENRIQUEZ</b>	3,69	36.423	9.871	5.538	6,1	4.222
<b>TOTAL</b>		881.394	236.296	132.562		101.079

**Tabla 3.14:** Ancho de banda requerido para brindar el servicio de Internet a la provincia del Azuay. Año 2020.

### 3.3.4.2 Proyección de usuarios del servicio de telefonía

Para el servicio de Voz sobre IP no se cuenta con datos actuales de los usuarios del mismo, sin embargo, se puede hacer una aproximación mediante los usuarios de telefonía fija y usuarios de Internet. A continuación, se presenta el número de abonados de telefonía fija en la provincia del Azuay. Datos presentados por la ARCOTEL con fecha de corte en noviembre de 2015 y publicación en diciembre del mismo año. [50]

Fecha	Abonados
nov-15	175.152

**Tabla 3.15:** Habitantes de la provincia del Azuay que cuentan con el servicio de telefonía fija. Arcotel. Noviembre 2015. [31]

#### 3.3.4.2.a Demanda inicial del servicio de telefonía

Debido a la falta de estadísticas actuales del nivel de penetración de VoIP en la provincia del Azuay, se hace el supuesto de que todos los usuarios de Internet también lo serán del servicio de Voz sobre IP. Además, el ancho de banda requerido para brindar éste servicio es mínimo, 0.1 Megas, comparado con el requerido para televisión e Internet, de 2 Megas por canal SD a 8 Megas por canal HD y 6.1 Megas respectivamente.

### 3.3.4.2.b Cálculo del ancho de banda inicial para el servicio de telefonía

Ya que previamente se ha determinado que todos los usuarios del servicio de Internet, lo serán también de VoIP, para el servicio de telefonía se le agrega 0.1 Megas al ancho de banda requerido para el servicio de Internet.

Cantón	Año 2016	Hogares por cantón 2016	Aproximación de hogares con Internet. 26.44%	Ancho de banda Internet más VoIP (Mbps)	Ancho de banda por cantón. (Mbps)
CUENCA	591.996	158.712	41.963	6,2	32.522
GIRON	13.157	3.665	969	6,2	751
GUALACEO	47.411	12.219	3.231	6,2	2.504
NABON	17.084	4.461	1.179	6,2	914
PAUTE	28.246	7.676	2.030	6,2	1.573
PUCARA	10.601	2.624	694	6,2	538
SAN FERNANDO	4.183	1.159	306	6,2	237
SANTA ISABEL	20.298	5.486	1.450	6,2	1.124
SIGSIG	29.630	7.880	2.083	6,2	1.615
OÑA	3.982	1.221	323	6,2	250
CHORDELEG	14.360	3.860	1.021	6,2	791
EL PAN	3.140	981	259	6,2	201
SEVILLA DE ORO	6.604	1.876	496	6,2	384
GUACHAPALA	3.750	1.065	282	6,2	218
CAMILO PONCE ENRIQUEZ	30.204	8.185	2.164	6,2	1.677
TOTAL	824.646	221.071	58.451		45.299

**Tabla 3.16:** Ancho de banda requerido para brindar los servicios de Internet y telefonía a la provincia del Azuay. Año 2016.

### 3.3.4.2.c Proyección del crecimiento de usuarios y ancho de banda del servicio de telefonía para el año 2020

Como ya se había determinado, se considera al servicio de telefonía como un servicio adicional al servicio de Internet, por tanto, la proyección del crecimiento de telefonía se basa en la proyección del crecimiento de Internet.

Cantón	Promedio de personas por hogar	2020	Hogares por cantón 2020	Aproximación de hogares con Internet. 56.10%	Ancho de banda Internet más	Ancho de banda por cantón (Mbps)
--------	--------------------------------	------	-------------------------	--	-----------------------------	----------------------------------

VoIP (Mbps)						
<b>CUENCA</b>	3,73	636.996	170.776	95.805	6,2	74.249
<b>GIRON</b>	3,59	13.037	3.631	2.037	6,2	1.579
<b>GUALACEO</b>	3,88	49.104	12.656	7.100	6,2	5.503
<b>NABON</b>	3,83	17.292	4.515	2.533	6,2	1.963
<b>PAUTE</b>	3,68	29.214	7.939	4.454	6,2	3.452
<b>PUCARA</b>	4,04	10.584	2.620	1.470	6,2	1.139
<b>SAN FERNANDO</b>	3,61	4.156	1.151	646	6,2	500
<b>SANTA ISABEL</b>	3,7	20.935	5.658	3.174	6,2	2.460
<b>SIGSIG</b>	3,76	30.509	8.114	4.552	6,2	3.528
<b>OÑA</b>	3,26	4.128	1.266	710	6,2	550
<b>CHORDELEG</b>	3,72	15.176	4.080	2.289	6,2	1.774
<b>EL PAN</b>	3,2	3.091	966	542	6,2	420
<b>SEVILLA DE ORO</b>	3,52	6.890	1.957	1.098	6,2	851
<b>GUACHAPALA</b>	3,52	3.859	1.096	615	6,2	477
<b>CAMILO PONCE ENRIQUEZ</b>	3,69	36.423	9.871	5.538	6,2	4.292
<b>TOTAL</b>		881.394	236.296	132.562		102.736

**Tabla 3.17:** Ancho de banda requerido para brindar los servicios de Internet y telefonía a la provincia del Azuay. Año 2020.

### 3.3.4.3 Proyección de usuarios del servicio de televisión

A continuación, se muestra información estadística del número de personas en el Azuay con acceso al servicio de televisión. Los datos han sido obtenidos de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) con corte en septiembre de 2015 y publicación en diciembre del mismo año. [50]

Nombre Estación	Cobertura	Suscriptores sep-15
<b>CABLE VISION</b>	CAMILO PONCE ENRIQUEZ, RIO BONITO	0
<b>CABLE VISION PAUTE</b>	CANTON PAUTE	1071
<b>CHAVELO TV</b>	SANTA ISABEL, ABDON CALDERON, GUALDELEG, PILCOCAJAS, SAN ANTONIO, LA ATALAYA, PORTOVELO, CATAVIÑA, ASUNCIÓN, LENTAG, COCHALOMA	553
<b>CONEXION GLOBAL</b>	SIGSIG, GUEL, CUCHIL, SAN BARTOLOME, PRINCIPAL, LUIS GALARZA ORELLANA, SAN MARTIN DE PUZHIO	593
<b>CONEXION GLOBAL</b>	GÜEL, PARROQUIA PRINCIPAL, LUIS GALARZA ORELLANA, SAN MARTIN DE PUZHIO	120

<b>ETAPA TV</b>	TERRITORIO CONTINENTAL ECUATORIANO	3471
<b>GIRON TV</b>	GIRON	249
<b>GLOBAVISION</b>	CAMILO PONCE ENRIQUEZ, RIO BONITO	602
<b>GUALACEO TV</b>	GUALACEO, CHORDELEG	2616
<b>NABON CABLE</b>	NABON	71
<b>REINA DE EL CISNE TV</b>	PARROQUIA CUMBE	221
<b>SAN FERNANDO CABLE</b>	SAN FERNANDO	164
<b>SATELCOM</b>	CUENCA	12260
<b>SERVICABLE</b>	CUENCA	1932
<b>WEBCABLE</b>	EL VALLE (CANTON CUENCA), MONAY	324
	<b>TOTAL DE USUARIOS</b>	24247

**Tabla 3.18:** Suscriptores de la provincia del Azuay que cuentan con el servicio de televisión pagada. Arcotel. Septiembre 2015. [50]

### 3.3.4.3.a Demanda inicial del servicio de televisión

Para la demanda inicial del servicio de televisión sobre IP se va a suponer un nivel de penetración inicial equivalente al mejor de los casos de penetración de televisión pagada en cada sector presentado en la Tabla 3.18.

Nombre Estación	Cobertura	Suscriptores sep-16
<b>CABLE VISION PAUTE</b>	CANTON PAUTE	1401
<b>CHAVELO TV</b>	SANTA ISABEL, ABDON CALDERON, GUALDELEG, PILCOCAJAS, SAN ANTONIO, LA ATALAYA, PORTOVELO, CATAVIÑA, ASUNCIÓN, LENTAG, COCHALOMA	723
<b>CONEXION GLOBAL</b>	SIGSIG, GUEL, CUCHIL, SAN BARTOLOME, PRINCIPAL, LUIS GALARZA ORELLANA, SAN MARTIN DE PUZHIO	775
<b>CONEXION GLOBAL</b>	GÜEL, PARROQUIA PRINCIPAL, LUIS GALARZA ORELLANA, SAN MARTIN DE PUZHIO	157
<b>GIRON TV</b>	GIRON	326
<b>GLOBAVISION</b>	CAMILO PONCE ENRIQUEZ, RIO BONITO	787
<b>GUALACEO TV</b>	GUALACEO, CHORDELEG	3421
<b>NABON CABLE</b>	NABON	93
<b>SAN FERNANDO CABLE</b>	SAN FERNANDO	214
<b>SATELCOM</b>	CUENCA	16037
	<b>TOTAL DE USUARIOS</b>	23905

**Tabla 3.19:** Demanda inicial del servicio de televisión sobre IP. Año 2016.**3.3.4.3.b Cálculo del ancho de banda inicial para el servicio de televisión**

Para el servicio de IPTV se proponen distintos planes. Se toma como referencia el estudio realizado por Daniel Chiqui en el año 2015, en el cual se encuestan a 245 usuarios del servicio de banda ancha; los planes propuestos han sido realizados considerando que el 36% de los cuencanos encuestados poseen en sus hogares más de tres televisores, mientras que, el 30% poseen tres, el 20% tiene dos y el 4% un solo televisor. [53]

Tipo de plan	Prestaciones	Ancho de banda
<b>PLAN BÁSICO</b>	2 canales SD	4 Megas
<b>PLAN MEDIO</b>	2 canales SD + 1 canal HD	12 Megas
<b>PLAN ALTO</b>	1 canales SD + 3 canales HD	26 Megas

**Tabla 3.20:** Planes diferenciados. Servicio IPTV

Por cuestiones sociales y económicas, para el dimensionamiento del servicio de televisión, se va a considerar un plan bajo para los cantones menos poblados y con menor actividad económica, un plan medio para los cantones medianamente poblados y con actividad económica media y un plan alto para los cantones más poblados y con mayor actividad laboral. Se considera también el índice de penetración de televisión pagada en cada cantón.

Cantón	%PEA
<b>CUENCA</b>	70,9
<b>SAN FERNANDO</b>	5,7
<b>GUALACEO</b>	3,9
<b>SIGSIG</b>	3,8
<b>OÑA</b>	3,3
<b>PUCARA</b>	3
<b>GIRON</b>	2,4
<b>SANTA ISABEL</b>	2,2
<b>CHORDELEG</b>	1,9
<b>EL PAN</b>	0,9
<b>NABON</b>	0,6
<b>PAUTE</b>	0,5
<b>SEVILLA DE ORO</b>	0,5
<b>GUACHAPALA</b>	0,5

**Tabla 3.21:** Población económicamente activa. Azuay

**Fuente:** Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay, 2011 (datos tratan sobre el año 2001).

La tabla que se exhibe a continuación muestra el ancho de banda que requiere cada uno de los sectores detallados en la misma, según los planes indicados anteriormente. Se ha dispuesto dimensionar la red utilizando solamente los planes medio y bajo, dejando el plan alto como una opción para un futuro crecimiento de la red.

Cobertura	Suscriptores año 2016	Ancho de Banda (Mbps)	Tipo de plan
CANTON PAUTE	1401	16812	Plan Medio
SANTA ISABEL, ABDON CALDERON, GUALDELEG, PILCOCAJAS, SAN ANTONIO, LA ATALAYA, PORTOVELO, CATAVIÑA, ASUNCIÓN, LENTAG, COCHALOMA	723	2892	Plan Básico
SIGSIG, GUEL, CUCHIL, SAN BARTOLOME, PRINCIPAL, LUIS GALARZA ORELLANA, SAN MARTIN DE PUZHIO	775	9300	Plan Medio
GÜEL, PARROQUIA PRINCIPAL, LUIS GALARZA ORELLANA, SAN MARTIN DE PUZHIO	157	1884	Plan Medio
GIRON	326	3912	Plan Medio
CAMILO PONCE ENRIQUEZ, RIO BONITO	787	3148	Plan Básico
GUALACEO, CHORDELEG	3421	41052	Plan Medio
NABON	93	372	Plan Básico
SAN FERNANDO	214	856	Plan Básico
CUENCA	16037	192444	Plan Medio
TOTAL DE USUARIOS	23905	272672	

**Tabla 3.22:** Ancho de banda necesario para brindar el servicio de IPTV en la provincia del Azuay. (Año 2016).

### 3.3.4.3.c Proyección del crecimiento de usuarios y ancho de banda del servicio de televisión para el año 2020

Para realizar la proyección de usuarios que tendrá el servicio de televisión pagada en el año 2020, se considera el porcentaje de penetración que éste servicio tuvo en el año 2010 y se prevé el mismo aumento para el año en cuestión.

Según informe de ARCOTEL en el año 2010 el servicio de televisión pagada tuvo en el país un porcentaje de penetración del 9.60% y en el año 2015 éste ascendió a 30.81%. Es decir, hubo un aumento del 21.21%, lo que significa que para el año 2020 el porcentaje de penetración será de 52,02%. Para realizar esta proyección se ha supuesto un crecimiento completamente lineal del servicio, sin considerar factores del tipo económico y social.

Cobertura	Proyección suscriptores 2020	Ancho de Banda (Megas)	Tipo de plan
CANTON PAUTE	1628	19536	Plan Medio
SANTA ISABEL, ABDON CALDERON, GUALDELEG, PILCOCAJAS, SAN ANTONIO, LA ATALAYA, PORTOVELO, CATAVIÑA, ASUNCIÓN, LENTAG, COCHALOMA	841	3364	Plan Básico
SIGSIG, GUEL, CUCHIL, SAN BARTOLOME, PRINCIPAL, LUIS GALARZA ORELLANA, SAN MARTIN DE PUZHIO	901	10812	Plan Medio
GÜEL, PARROQUIA PRINCIPAL, LUIS GALARZA ORELLANA, SAN MARTIN DE PUZHIO	182	2184	Plan Medio
GIRON	379	4548	Plan Medio
CAMILO PONCE ENRIQUEZ, RIO BONITO	915	3660	Plan Básico
GUALACEO, CHORDELEG	3977	47724	Plan Medio
NABON	108	432	Plan Básico
SAN FERNANDO	249	996	Plan Básico
CUENCA	18638	223656	Plan Medio



<b>TOTAL DE USUARIOS</b>	27818	316912	
--------------------------	-------	--------	--

**Tabla 3.23:** Ancho de banda necesario para brindar el servicio de IPTV en la provincia del Azuay. (Año 2020).

#### 3.3.4.4 Dimensionamiento para el servicio integrado *Triple Play*

Según la proyección realizada, para el año 2020 se tendrán aproximadamente 236.296 posibles suscriptores para los servicios de telefonía e Internet (Tabla 3.17). El número de posibles suscriptores en ese mismo año para el servicio de IPTV es de al menos 27818 (Tabla 3.23).

Para dimensionar el ancho de banda que se requiere para brindar el servicio integrado *Triple Play* por suscriptor, se asume un ancho de banda de 6.1 Mbps para el servicio de Internet, 0.1 Mbps para telefonía y para el servicio de IPTV 4Mbps, 12 Mbps.

Para obtener el ancho de banda total aproximado, se toma en cuenta el ancho de banda para los suscriptores de Internet y telefonía obtenido en la Tabla 3.17, y se suma el ancho de banda necesario para brindar IPTV obtenido en la Tabla 3.23.

$$\text{Ancho de Banda} = 102736 \text{ Mbps} + 316912 \text{ Mbps} = 419648 \text{ Mbps}$$

#### 3.3.5 Selección de equipos

En éste trabajo investigativo se ha escogido equipos de la marca Cisco, sin embargo, existen otras marcas que ofrecen similares prestaciones, tales como son Juniper, HP, Alcatel, Huawei, entre otras.

##### 3.3.5.1 Equipos LSR

Entre los principales requerimientos para los equipos LSR se encuentran los siguientes:

- Soporte MPLS, QoS, Cos, VPN.
- Equipos que permitan escalabilidad de la red, es decir, modularidad.
- Interfaces de fibra óptica

- Interfaces de 10 Gbps Ethernet
- Soporte de protocolos de señalización como RSVP o LDP.
- Soporte de protocolos de capa 2 y en capa 3 soporte de un gran número de protocolos de enrutamiento.
- Soporte de IPv4 e IPv6.

Como equipos LSR se ha seleccionado conmutadores de capa 3 debido a que se requiere soporte de protocolos de ruteo y además alta velocidad de *switch*eo.

Se ha seleccionado el equipo Cisco Catalyst 6506, un *switch* de capa 3 con soporte para QoS, MPLS, RSVP, RSVP-TE, LDP y MPLS/VPN. Con velocidad de reenvío de 400 Mpps en IPv4 y hasta 200 Mpps en IPv6. En cuanto a protocolos de enrutamiento soporta OSPF, IS-IS, EIGRP, RIP y BGP. Posee una velocidad de backplane de 720 Gbps.



**Figura 3.14:** Cisco Catalyst 6506

**Fuente:** [www.cisco.com](http://www.cisco.com)

### 3.3.5.1 Equipos LER

Entre los principales requerimientos para los equipos LSR se encuentran los siguientes:

- Soporte IP/MPLS, QoS, Cos, VPN.
- Interfaces de fibra óptica
- Interfaces de 10 Gbps Ethernet
- Soporte de gran número de protocolos de enrutamiento.
- Flexibilidad en los módulos para futuro crecimiento de la red.

Como equipos LER se elige la serie 7600 ya que es un *router* capaz de soportar MPLS VPNs, Ethernet sobre MPLS, frame relay sobre MPLS, MPLS CoS, RSVP, LDP, VPLS, H-VPLS y más. Además, soporta una gran cantidad de protocolos de ruteo como son: IGRP, EIGRP, RIP, RIP 2, BGP4, IS-IS, RTMP y OSPF. Permite la configuración de QoS y DiffServ con altas velocidades de reenvío. También soporta un amplio rango de interfaces, desde 10/100 hasta 10 Gigabit Ethernet. Tiene una capacidad de conmutación de 720 Gbps.



**Figura 3.15:** Router Cisco. Serie 7600

**Fuente:** [www.cisco.com](http://www.cisco.com)

### 3.3.5.3 Enlaces

Los enlaces que se van a utilizar son enlaces de alta velocidad de tecnología óptica SONET (Synchronous Optical Network). A continuación, se exhibe una tabla con los distintos portadores ópticos y sus respectivas velocidades.

Señal eléctrica	Portadora óptica	Velocidad binaria (Mbit/s)	Equivalencia SDH
<b>STS-1</b>	OC-1	51,84	STM-0
<b>STS-3</b>	OC-3	155,52	STM-1
<b>STS-9</b>	OC-9	466,56	-
<b>STS-12</b>	OC-12	622,08	STM-4
<b>STS-18</b>	OC-18	933,12	-
<b>STS-24</b>	OC-24	1244,16	-
<b>STS-36</b>	OC-36	1866,24	-

<b>STS-48</b>	OC-48	2488,32	STM-16
<b>STS-96</b>	OC-96	4976,64	-
<b>STS-192</b>	OC-192	9953,28	STM-64
<b>STS-256</b>	OC-256	13271,04	-
<b>STS-384</b>	OC-384	19906,56	-
<b>STS-768</b>	OC-768	39813,12	STM-256
<b>STS-1536</b>	OC-1536	79626,24	-
<b>STS-3072</b>	OC-3072	159252,48	-

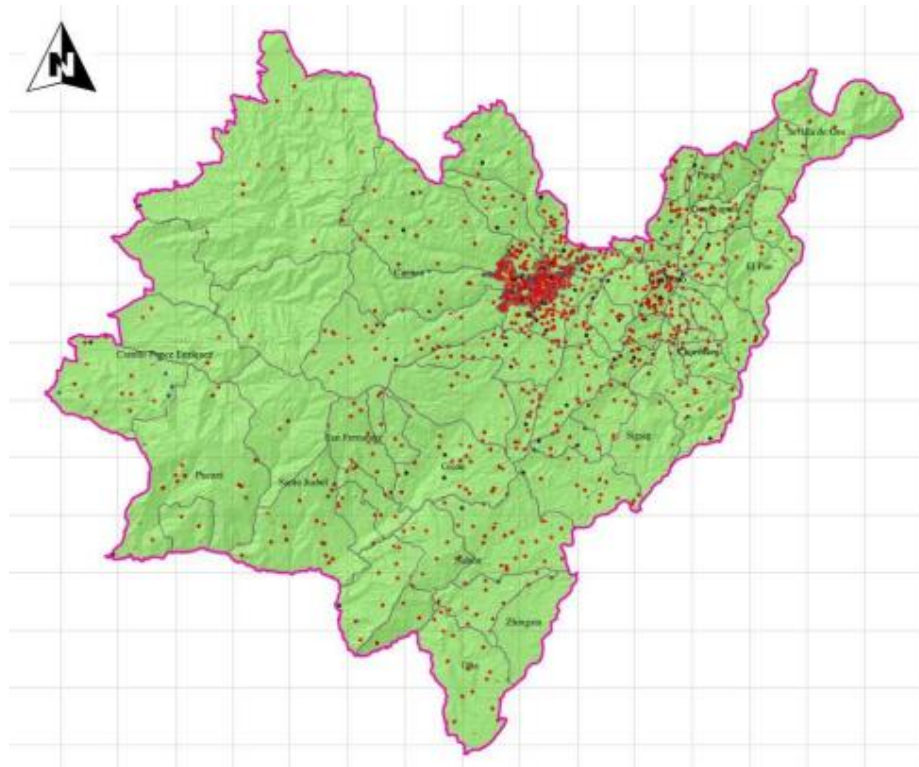
**Tabla 3.24:** Portadores ópticos. Tecnología SONET.

### 3.3.6 Diseño de la red

El diseño de la red de *backbone* se basa en la cantidad de usuarios de los servicios de IPTV, voz e Internet y el ancho de banda que se va a utilizar para dicho fin. Además, es preciso conocer la densidad poblacional aproximada en cada uno de los cantones para saber en dónde ubicar los equipos.

En la Tabla 3.16 se observa el mapa del Azuay con el tipo de vivienda que existe en cada cantón. Esto permite una aproximación de la densidad poblacional por sectores.

Para el diseño de la red de núcleo se ha colocado como LER de entrada tres *routers* de la familia de Cisco 7600, estos *routers* soportan la carga total del tráfico de la red de núcleo. Cada uno de los *routers* es el encargado del transporte del tráfico de cada servicio, de esta manera el *router* LERin1 transporta el tráfico de Internet, LERin2 tráfico de voz y LERin3 tráfico de televisión.



**Figura 3.16:** Tipo de vivienda por cantón. Provincia del Azuay

**Fuente:** Gobierno provincial del Azuay

En cuanto a los LSR se ha colocado cuatro *switches* de capa 3 Cisco Catalyst 6506. Esto implica que cada uno de los *switches* tendrá una carga de aproximadamente 104912 Mbps. En caso de falla en alguno de los equipos, los restantes se encargarán de transportar todo el tráfico de la red.

Los LER de salida han sido colocados en distintos sectores para posteriormente cubrir el territorio de la provincia del Azuay mediante la capa de distribución. Con el objetivo de lograr un balanceo de carga, el ancho de banda ha sido distribuido de la manera más uniforme posible, tratando de respetar la ubicación geográfica de los cantones. Son ocho LERs de salida distribuidos en toda la provincia, los cuales han sido ubicados considerando la densidad poblacional del sector al cual va a entregar los servicios y el ancho de banda requerido por dicha zona.

Debido a que la población del cantón Cuenca es sustancialmente superior a la población de los demás cantones, el ancho de banda que se requiere para brindar servicios a este cantón es también por mucho, superior al ancho de banda de los demás cantones. Por este motivo y con el objetivo de balancear la carga, el 5% de los usuarios del cantón Cuenca ha sido otorgado al LER de salida número tres. Por otra parte, la carga de usuarios y ancho de banda demandado por el sector 2, es superior al demandado por el sector 1, por lo cual, el 20% de usuarios del segundo sector se

otorgan al primero. Los sectores en los cuales se ha colocado los LERs de salida se detallan a continuación:

Sectores	Cantones
<b>Sector 1</b>	Sevilla de Oro, Guachapala, Paute, El Pan, Gualaceo
<b>Sector 2</b>	Chordeleg, Sigüig, Parte del suroeste de Gualaceo
<b>Sector 3</b>	Camilo Ponce Enríquez, Pucará, Santa Isabel, San Fernando, Girón, Nabón, Oña, Parte del suroeste de Cuenca
<b>Sector 4</b>	Cuenca

**Tabla 3.25:** Sectores de la provincia del Azuay para colocación de LERs de salida

A continuación, se detalla el ancho de banda requerido por cada uno de los sectores en el año 2020. Los valores han sido obtenidos de los presentados en las Tablas 3.16 y 3.19. Cabe recalcar que los resultados presentados a continuación son valores aproximados. Los cálculos han sido realizados con el objetivo de analizar el tráfico que fluye por cada LER de salida y poder así lograr un balanceo de carga, además, se ha tomado como plan de televisión, el plan medio, para todos los casos.

Año 2020					
Sectores de la provincia del Azuay	Población por sector	Usuarios de servicios de Internet y VoIP	Usuarios del servicio integrado <i>Triple Play</i>	Ancho de Banda. Internet, VoIP. (Megas)	Ancho de Banda. <i>Triple Play</i> . (Megas)
<b>Sector 1</b>	19691	11022	3423	8542	49618
<b>Sector 2</b>	17117	9603	3265	7442	46622
<b>Sector 3</b>	37251	20189	3424	16135	57211
<b>Sector 4</b>	162237	91021	17706	70541	283013
<b>Total</b>	236296	132465	27818	102660	436464

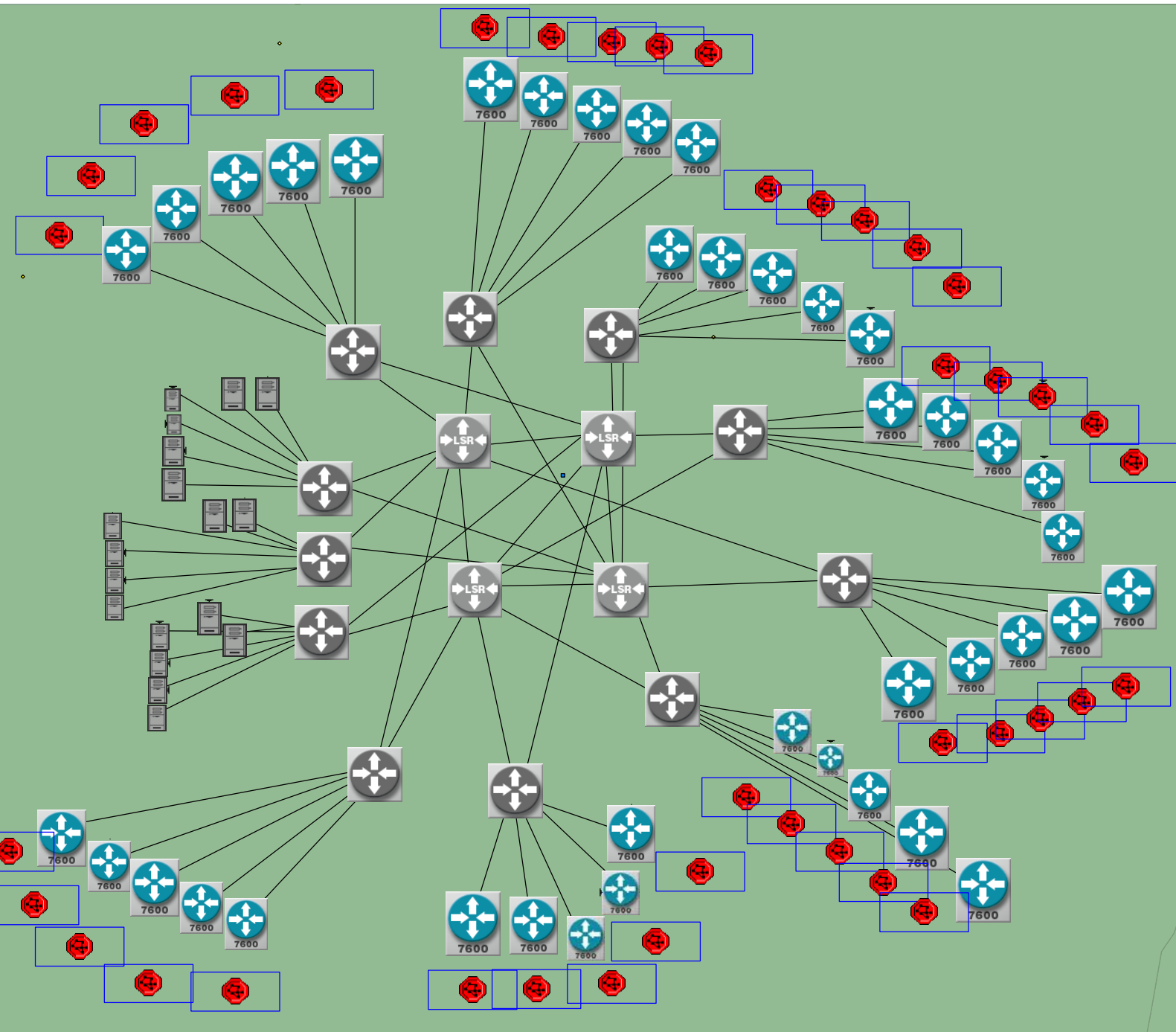
**Tabla 3.26:** Usuarios de Internet, IPTV y VoIP por sectores en donde se colocará LERs de salida. Año 2020

En cuanto a los servidores, se van a utilizar tres, uno por cada servicio, voz, datos y televisión. Dado a que el medio de obtención de los servicios no es el objetivo de estudio de la tesis, simplemente se colocan los tres servidores a los cuales se les agrega tráfico.

Para los enlaces principales de la red núcleo MPLS se va a utilizar el portador OC-1536, ya que éste brinda una velocidad de 79626 Mbps, suficiente para el transporte de los datos en la red anteriormente planteada, la cual soporta una cantidad de tráfico total equivalente a 648764 Mbps. Como enlaces de *backup* se va a utilizar OC-768,

portador de menor capacidad, 39813 Mbps, pero suficiente para mantener en operativo la red hasta que se solucione el problema y vuelva a operar el enlace principal.

### 3.3.7 Gráfico del diseño de la red



**Figura 3.17:** Diseño de la red núcleo con MPLS para servicio *Triple Play* en la provincia del Azuay. Revisar Anexo A

## **CAPITULO 4**

---

### **IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA RED NÚCLEO**



---

## 4.1 Herramienta de simulación OPNET

Mediante el análisis realizado en el Capítulo 3, se ha determinado que el *software* que se va a utilizar para este trabajo investigativo es OPNET en su versión 14.5 específicamente.

### 4.1.1 Creación de un nuevo proyecto en la herramienta de simulación OPNET

Para la creación de un nuevo proyecto de OPNET lo primero que se debe hacer es arrancar el programa como administrador, esto debido a que solo así se tiene acceso a los módulos disponibles y a sus funcionalidades.

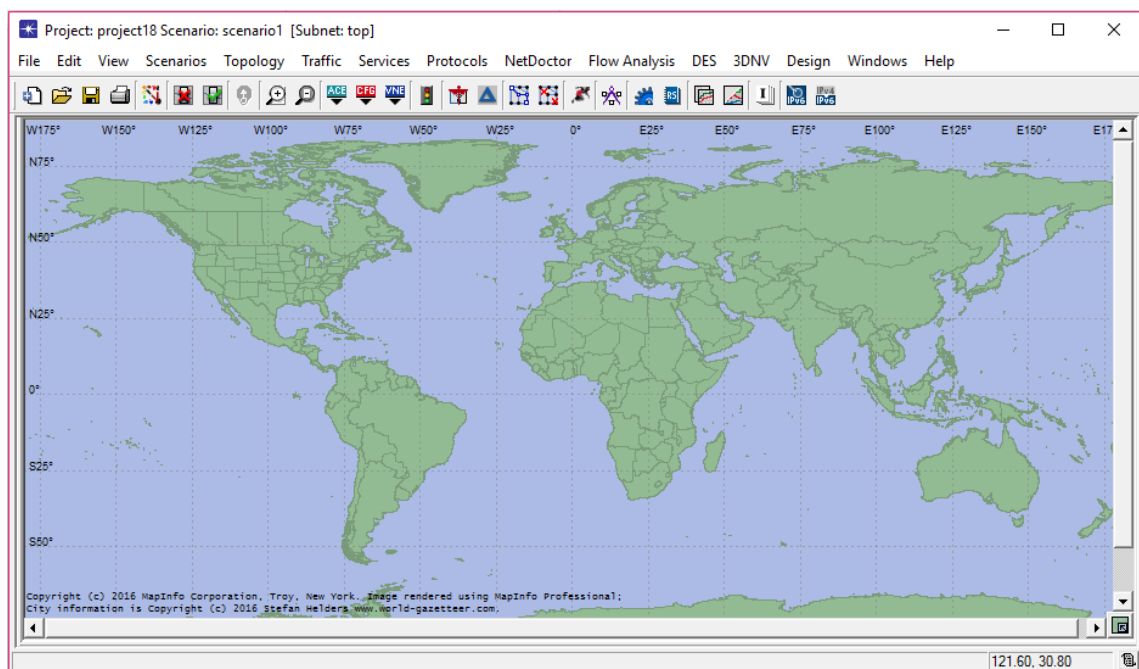
A continuación, se abre la ventana principal del OPNET. En la pestaña File se elige la opción *New* y luego *Project*. Posteriormente el programa solicita nombrar al proyecto y al escenario, éste último es necesario ya que la herramienta permite la duplicación de escenarios.

Se selecciona la opción *Create an empty scenario* y en seguida el *software* solicita que se elija el tamaño de la red que se va a crear, entre sus opciones principales están: World, Enterprise, Campus, Office. El usuario puede elegir la opción que mejor se acople a sus necesidades, en éste caso, ya que la simulación de la presente investigación está ambientada en toda la provincia, la opción que mejor se acopla es la de World.

En la Figura 4.1 se muestra una interfaz con el mapa mundial, se puede usar zoom para ubicarse exactamente en el lugar en donde se desea armar la red, que en éste caso sería Ecuador, específicamente Azuay.

### 4.1.2 Generación de tráfico en OPNET

Para la simulación de los diferentes escenarios se debe generar el tráfico, el mismo que puede ser configurado de dos formas, en la primera se configura las diferentes aplicaciones mediante los bloques facilitados por OPNET, en la segunda se importa el tráfico mediante la herramienta de OPNET para importar tráfico, en los siguientes puntos se describirá cada una de las configuraciones.



**Figura 4.1:** Proyecto nuevo OPNET. Tamaño *World*.

#### 4.1.2.1 Tráfico explícito

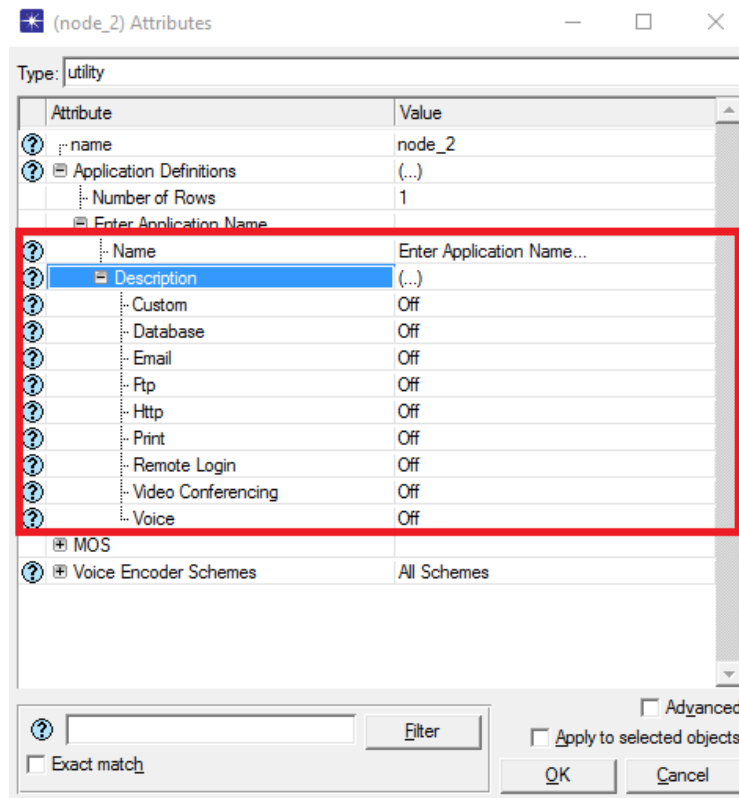
El tráfico explícito permite la configuración de diferentes aplicaciones mediante bloques configurables en OPNET. Estas aplicaciones representan tráfico de diferentes servicios como son: voz, video, Internet.

Mediante el bloque “Aplicación” definido en el punto 4.1.3 se puede configurar este tipo de tráfico. Esta opción es utilizada por defecto para modelar redes, sin embargo, se necesita de una gran cantidad de recursos computacionales para su ejecución.

Cada aplicación se asociará a un perfil que representa a los usuarios de la red, mediante ésta configuración se establece el tráfico que cursará por la red. Es decir, primero se configura las aplicaciones y luego se asocia ésta a los usuarios. En la Figura 4.2 se observa la configuración del tráfico explícito.

#### 4.1.2.2 Tráfico de fondo (*Background*)

A fin de reducir la carga computacional, puede ser utilizado el tráfico de fondo.



**Figura 4.2:** Generación de tráfico explícito en OPNET

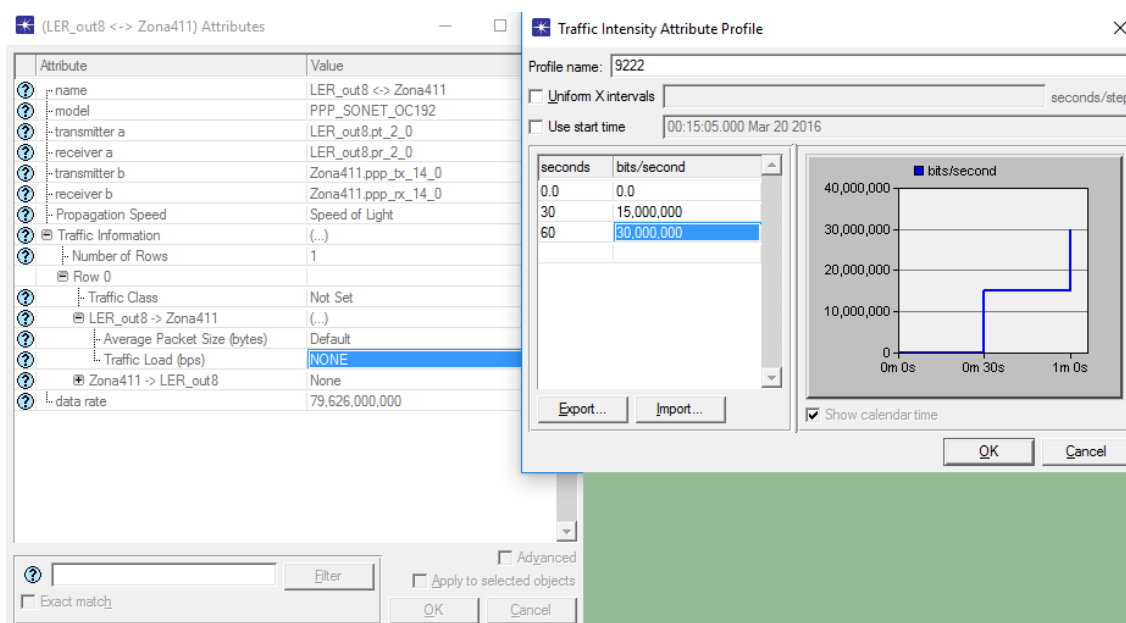
El tráfico es generalmente modelado de manera explícita, sin embargo, el tiempo y recursos que consume el proceso es elevado. En una red compleja el modelado de tráfico explícito puede llevar mucho tiempo y requerirá de una gran cantidad de recursos informáticos. En esta situación, se utiliza el tráfico de fondo.

El tráfico de fondo se modela a través de medios analíticos; lo cual reduce el tiempo de ejecución y la utilización de los recursos computacionales.

La implementación del tráfico de fondo se analiza con flujos IP, el cual permite analizar la red desarrollada en el tema de estudio, dado que los servicios *Triple Play* representan aplicaciones con bloques de información de tipo IP.

Para la configuración del tráfico de fondo se requiere elegir un enlace cualquiera y dar clic en las propiedades del mismo, en la sección de “*Traffic Information*” se configura el ancho de banda que cursará por dicho enlace, el mismo que representa la información que se transmite entre los equipos conectados a través del enlace seleccionado.

Como se observa en la Figura el tráfico se detalla a través del tiempo, en donde en intervalos simétricos de tiempo se relaciona un ancho de banda. Este tráfico será el que curse por el enlace en la simulación.



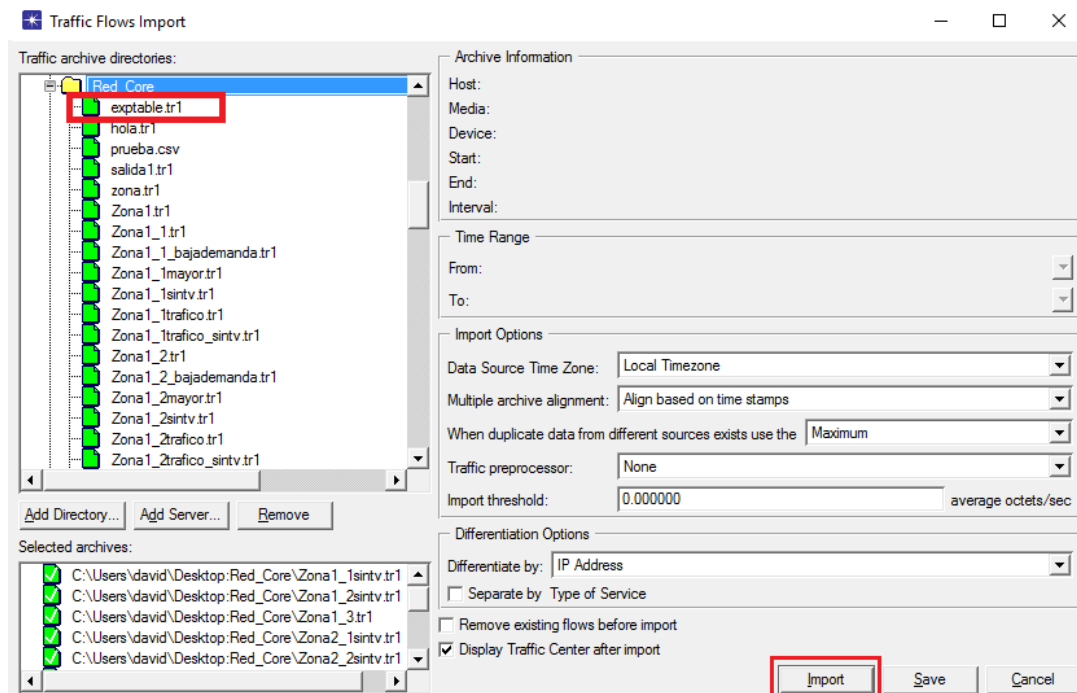
**Figura 4.3:** Generación de tráfico de fondo en OPNET

Para optimizar el tráfico de fondo, OPNET permite importar tráfico desde una herramienta externa, mediante la importación de un archivo .tr1 o .tr2, estos archivos contienen de forma automatizada el ancho de banda que correrá por cada enlace de la red, así como el intervalo de tiempo en el cual dicho tráfico ocupa el enlace, de esta manera se optimiza la forma de configurar el tráfico.

Para realizar la importación de tráfico se debe dar clic en la opción “Traffic--Import Traffic Flows--From Text (tr1, tr2)”, el cuadro que aparece permite seleccionar el archivo necesario, en la ventana se observa que los archivos con la extensión adecuada se resaltan de color verde. Después de seleccionar el archivo se importa la información.

#### 4.1.3 Equipos utilizados en OPNET para la creación de la red

De acuerdo al diseño de la red realizado en el capítulo anterior se identifica los diferentes equipos a utilizar en la simulación. Estos equipos forman parte de las librerías de OPNET.



**Figura 4.4:** Importación de tráfico en OPNET a través de archivos externos .tr1 o .tr2

**Ethernet 2 slip8 LER:** Representa los *router* de entrada y salida de la red MPLS. En OPNET este equipo se compone de dos puertos Ethernet y 8 puertos en serie para conexiones PPP WAN. Este *router* se conecta tanto en la entrada de la red como a la salida desde el dominio MPLS a otro dominio no MPLS como es el dominio IP. Dentro de la red MPLS el *router* LER se conecta con los *routers* LSR.

**Ethernet2 slip8 LSR:** LSR se conoce como el *router* de conmutación de etiquetas. Es el enrutador intermedio en el dominio MPLS. Tiene 2 puertos Ethernet y también tiene 8 interfaces en serie para las conexiones PPP WAN. Se considera como el núcleo del dominio MPLS. Se utiliza específicamente con el propósito de recibir el paquete etiquetado, intercambiar la etiqueta y transmitir al siguiente salto de la LSP. Una vez que el LSR está habilitado para MPLS, se construye el reenvío de información basado en etiquetas, así como el intercambio de las mismas.

**Enlace PPP:** Es el enlace utilizado para conectar las diferentes capas de la red. Entre estos se encuentran las conexiones entre los *routers* de distribución con los *routers* LER de salida, la conexión de la red núcleo (LER-LSR) y la conexión desde los LER de entrada con los servidores de los servicios.

El enlace PPP es de tipo dúplex configurado a la tasa de *bits* que corresponda según el diseño, para la red se ha elegido enlaces del tipo SONET-OC.

**Ethernet wkstn adv:** Es una herramienta de trabajo que se utiliza para la simulación de los usuarios de la red.

Se compone principalmente de una sola conexión Ethernet, a la velocidad que es establecida por el medio que se utilice para conectarse a un conmutador Ethernet. La estación del usuario se conecta al *router* LER de salida.

**Servidor de Ethernet:** El servidor de Ethernet que se proporciona en OPNET es principalmente utilizado para simular el servidor de aplicación en la red. Contiene principalmente una conexión Ethernet, éste se comunica con los equipos de usuario que tengan configurado el servicio ofertado por el servidor.

**Conmutador Ethernet 16:** Este módulo OPNET simula un *switch* Ethernet con un total de 16 puertos disponibles, este equipo se utiliza para asociar diferentes equipos de usuario a una misma subred.

**1000BaseT:** Mediante este equipo se puede configurar  $n$  número de usuarios, esto implica que en un mismo equipo se puede simular las diferentes zonas de la red núcleo.

**10 Gbps Ethernet:** Es un enlace dúplex de alta velocidad y se utiliza para conectar desde la red de distribución a la red de acceso. Este enlace de alta velocidad se utiliza en redes de distribución.

**MPLS LSP dinámico:** Cuando la topología de la red se construye para MPLS, los LSP se crean automáticamente dentro de la red. Estos LSP se basan en la topología IP siguiendo el camino más corto entre dos nodos según el enrutamiento seleccionado y configurado en la red, en este caso OSPF. OPNET se utiliza para simular el comportamiento de la LSP dinámico.

El LSP dinámico se va adaptando a las condiciones de la red cambiante. Un LSP dinámico se señala utilizando RSVP o CR-LDP. Estos protocolos de señalización se configuran cuando la simulación se ha iniciado. CR-LDP protocolo de señalización hace uso de los protocolos de enrutamiento dinámico para calcular la ruta LSP hacia un determinado destino.

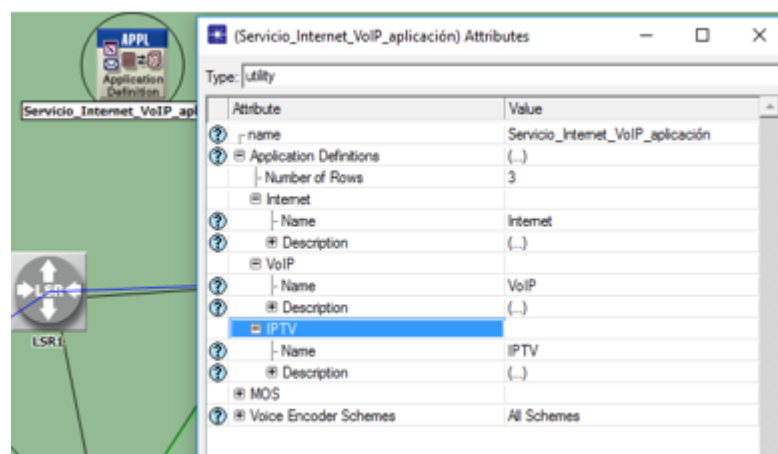
**MPLS LSP estático:** LSP Estático permitirá un mayor control de enrutamiento, así como el control en los fallos de los enlaces.

Además de los elementos de la red OPNET anteriormente mencionados, hay ciertos elementos de control utilizados para configurar las políticas de red, así como el ajuste de escenarios. Los objetos de control OPNET utilizados en este trabajo incluyen:

**Configuración de Aplicación:** Esta herramienta permite configurar diferentes aplicaciones además forma parte del tráfico explícito en OPNET.

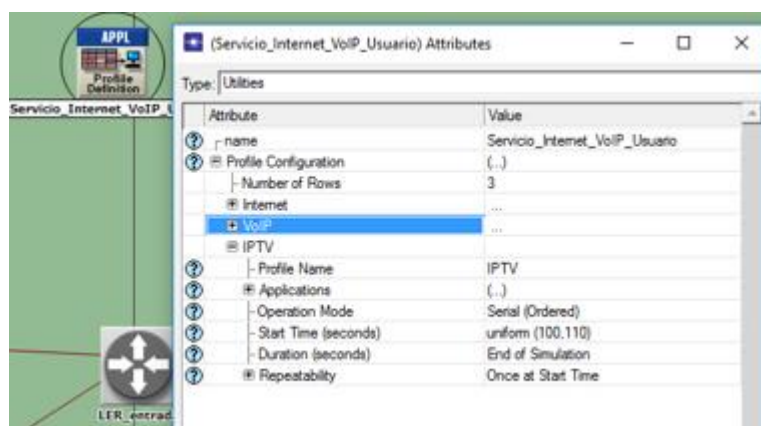
Dentro de esta herramienta se establece el tipo de aplicación que se utilizara en la red, cada aplicación tiene características que definen el ancho de banda que se utilizara en la red. En la Figura 4.5 se observa el bloque de “Configuración de Aplicación”.

**Configuración de Perfil:** Este bloque describe la actividad de un usuario individual o grupo de usuarios en función de las aplicaciones que se utilizan durante un período de tiempo. Cada perfil se asocia a una o varias aplicaciones, la misma que se configuran en el bloque “Aplicación”. Mediante este bloque se detalla las aplicaciones que son asignadas a los diferentes usuarios o grupos de usuarios por lo que cada perfil tiene propiedades diferentes. En la Figura 4.6 se observa el bloque de “Configuración de Perfil”.



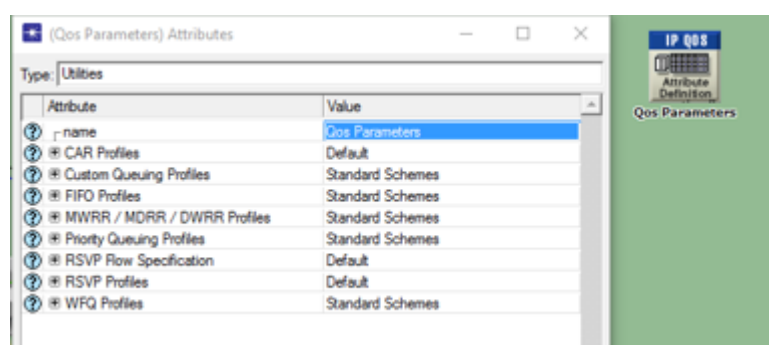
**Figura 4.5:** Bloque “Configuración Aplicación” en OPNET





**Figura 4.6:** Bloque “Configuración Perfil” en OPNET

**Atributo QoS Config:** Este componente configura diferentes condiciones de calidad de servicio que se llevarán a cabo en la red, esto permite diferenciar los diferentes servicios además de que muestra las características de cada flujo de tráfico. El ancho de banda se optimiza al usar este bloque. (Ver Figura 4.7).

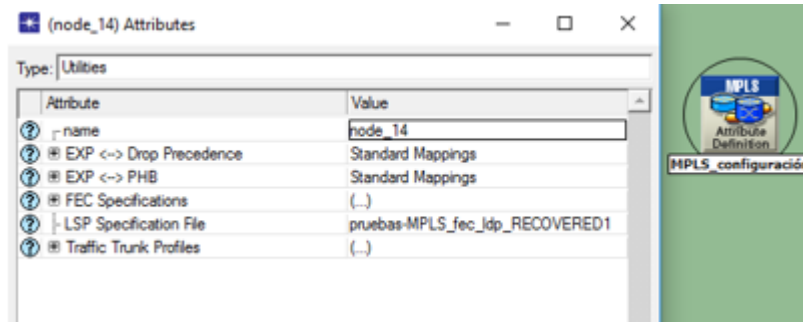


**Figura 4.7:** Bloque “Configuración QoS” en OPNET

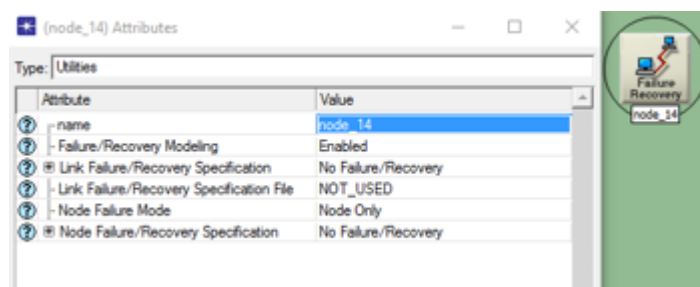
**MPLS Config:** Este bloque permite la configuración de MPLS, incluye la configuración de las etiquetas FEC, así como el archivo de configuración de las LSP. Esta configuración es principalmente utilizada en el enrutador de borde de entrada (LER entrada) para dirigir los flujos de tráfico y asignar a los diferentes IP las etiquetas para la diferenciación de tráfico. (Ver Figura 4.8).

**Fallo en enlaces y nodos:** Con el fin de analizar la red simulada durante/ después de la falla, OPNET presenta un elemento llamado fallo de enlaces o nodos. Esto permite analizar el funcionamiento de la red en caso de que una estructura de las misma falle. (Ver Figura 4.9).





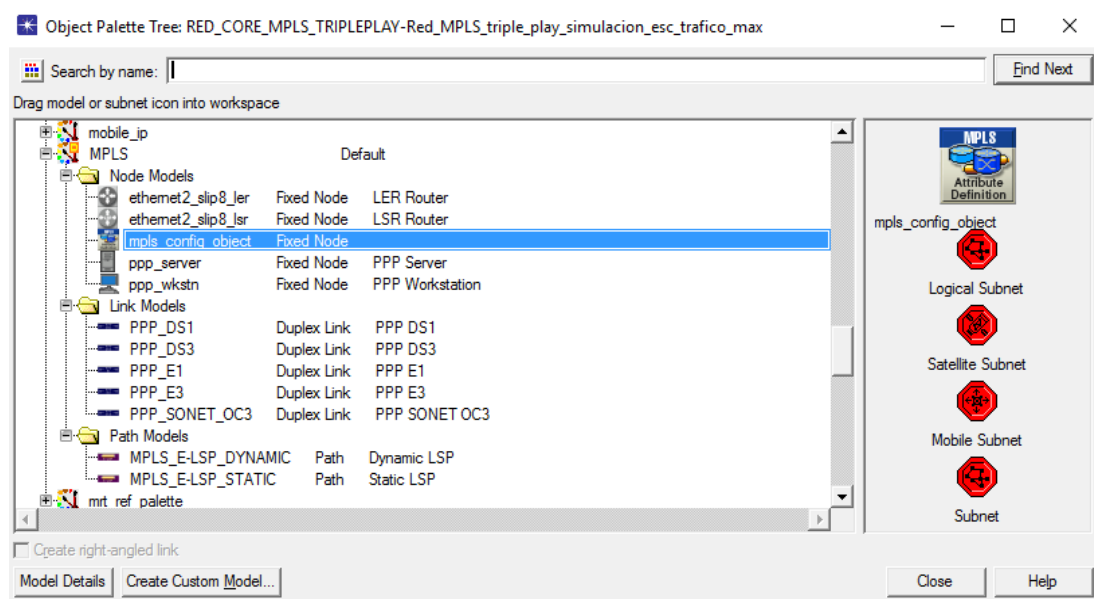
**Figura 4.8:** Bloque “Configuración MPLS” en OPNET



**Figura 4.9:** Bloque “Configuración Fallos en enlaces y nodos” en OPNET

## 4.2 Construcción de la red en OPNET

Para la construcción de la red, se toma en cuenta el diseño realizado en el capítulo 3. Para armar la red núcleo se ha utilizado equipos que soportan el protocolo MPLS, los cuales se pueden encontrar en la pestaña señalada como *MPLS*, dentro del Object Palette del *software* de simulación OPNET.



**Figura 4.10:** Herramienta MPLS en OPNET

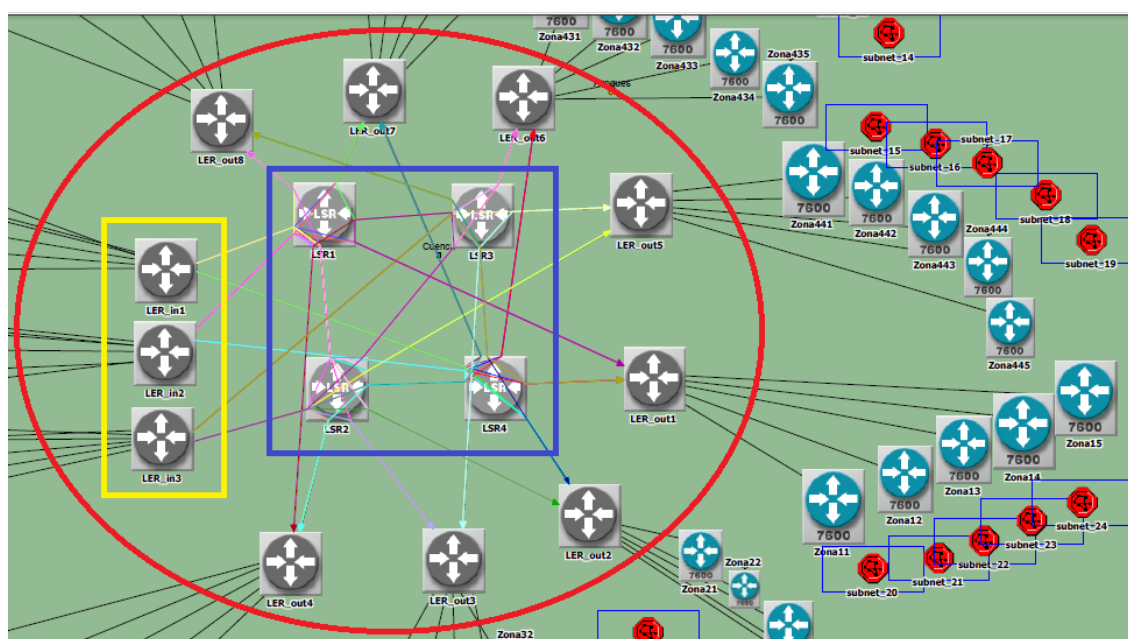
Según la distribución de los usuarios del servicio integrado *Triple Play*, se planificó para la red MPLS el uso de 4 *routers* LSR, 3 *routers* LER de entrada y 8 *routers* LER de salida.

Mientras que los *routers* LER de entrada están directamente conectados a los servidores de cada servicio de voz, Internet, televisión; los *routers* LER de salida están conectados a los *routers* de la capa de distribución de cada una de las zonas definidas en el capítulo 3, sección de Diseño.

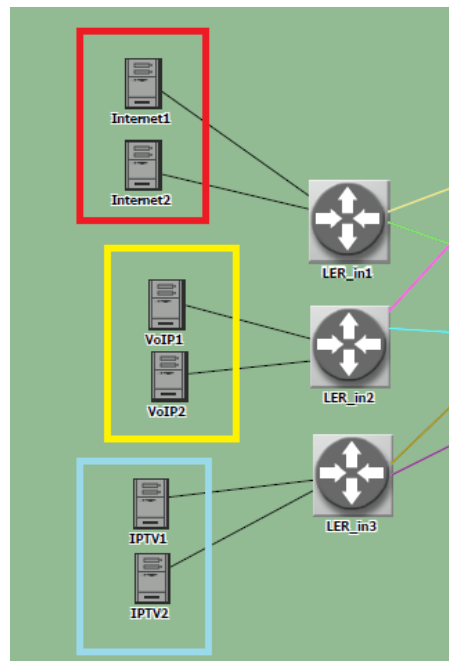
A continuación, se muestra la Figura 4.11 en donde se puede observar la red con sus distintos componentes. El círculo rojo indica el límite de la red de core, es decir, lo que se encuentra dentro de este círculo pertenece a la red núcleo, mientras que lo que está afuera, es parte de la capa de distribución y acceso.

El recuadro azul indica los cuatro LSRs y el amarillo los tres LERs de entrada. Los LERs de salida son los ocho equipos ubicados entre el recuadro azul y el círculo rojo.

La red núcleo permite la comunicación entre los usuarios y los servidores, en el caso de los servidores se indica en la Figura 4.12.



**Figura 4.11:** Equipos que integran la red núcleo



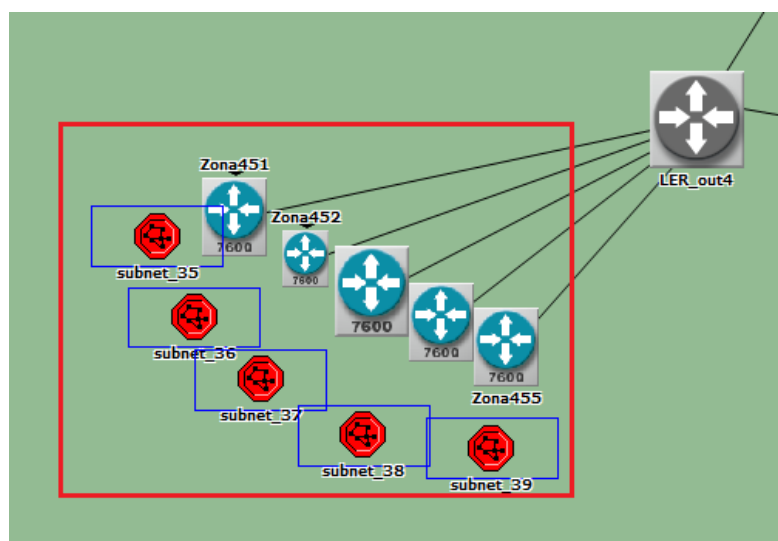
**Figura 4.12:** Servidores de Internet, VoIP, IPTV

El grupo de servidores de Internet se encuentra representado por el bloque de color rojo, los servidores de voz con el color amarillo y los servidores de TV con el bloque celeste.

Este grupo de servidores responderá las solicitudes que se recepen desde el grupo de usuarios. Con respecto a los LER de entrada, LER\_in1 es el *router* encargado de ingresar a la red el tráfico perteneciente al servicio de Internet, LER\_in2 tráfico de voz y LER\_in3 de televisión.

El grupo de usuarios se ha distribuido en 4 zonas principales, la cuarta zona, que es la perteneciente al cantón Cuenca, se encuentra subdividida en 5 sectores, esto debido a la cantidad de carga de usuarios y ancho de banda que representa este cantón (como se puede constatar en la parte de diseño en el Capítulo 3). Cada zona se conectará con 5 *routers* de distribución. En la siguiente gráfica se observa la conexión entre un *router* LER de salida y sus respectivos *routers* de distribución y acceso.

El número de *routers* de distribución y acceso han sido colocados de una manera arbitraria, ya que al no ser parte de la capa núcleo, su estudio y diseño se encuentran fuera del alcance del presente trabajo de investigación.



**Figura 4.13:** Router de distribución perteneciente a cada LER de salida

En la sección de diseño del Capítulo 3, se menciona que los enlaces a utilizar serán SONET. A continuación, se puede observar algunos de los tipos de enlaces SONET existentes en el *software* OPNET.

PPP_SONET_OC12	Duplex Link
PPP_SONET_OC12_int	Duplex Link
PPP_SONET_OC192	Duplex Link
PPP_SONET_OC1	Duplex Link
PPP_SONET_OC1_int	Duplex Link
PPP_SONET_OC24	Duplex Link
PPP_SONET_OC24_int	Duplex Link
PPP_SONET_OC3	Duplex Link
PPP_SONET_OC3_int	Duplex Link
PPP_SONET_OC48	Duplex Link

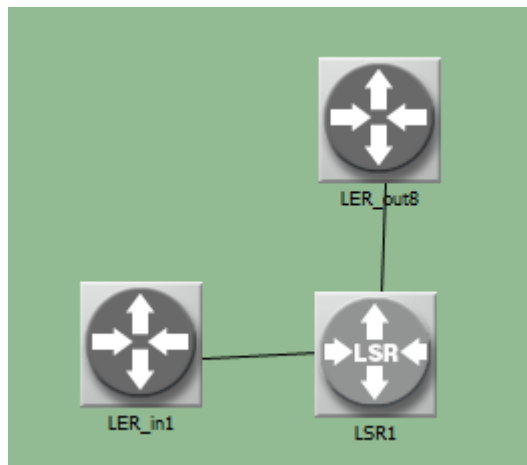
**Figura 4.14:** Enlaces SONET-OC soportados por OPNET

En la tabla que se exhibe en seguida, se indica cada uno de los enlaces existentes en la red con su respectivo valor.

Nombre del enlace	Tipo de enlace	Valor del enlace (Mbps)
LERin1-LSRx	SONET_OC1536	79626
LERin2-LSRx	SONET_OC48	2488
LERin3-LSRx	SONET_OC3072	159252
LSRx-LSRx	SONET_OC3072	159252
LSRx-LERoutx	SONET_OC1536	79626

**Tabla 4.1:** Enlaces utilizados en la red núcleo

Para nombrar los enlaces se ha considerado la siguiente lógica:



**Figura 4.15:** Lógica para nombrar los enlaces de la red núcleo

Nombre del primer enlace: LERin1-LSR1

Nombre del segundo enlace: LSR1-LEROUT8

### 4.3 Configuración de la red en OPNET

#### 4.3.1 Generación de diferentes tipos de tráfico y sus respectivas prioridades (Priorización de tráfico)

Para realizar la simulación de la red núcleo se va a utilizar tráfico de *background* ya que la carga de tráfico total de la red tiene un valor alto (aproximadamente 450 Gbps) que al ser enviado como tráfico explícito podría consumir demasiados recursos computacionales causando un excesivo retardo al momento de ejecutar la simulación.

Con el objetivo de dinamizar la red, el tráfico es creado mediante el *software* de programación MATLAB, en donde se ha implementado una interfaz amigable con el usuario, quien puede elegir distintos parámetros como son: las zonas del Azuay en la que desea brindar los servicios, servicios a ofrecer; para el servicio de voz: el códec, el tiempo y duración de la llamada; para Internet: el plan (cantidad de Megas que desea ofrecer); para televisión: el códec y el tipo de plan.

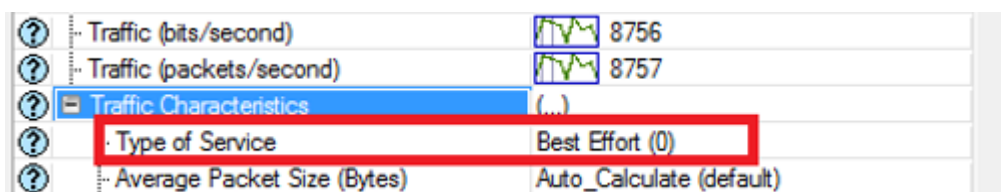
Además, se puede elegir el año en el que se desea dimensionar la red y el porcentaje de tráfico que cursará por la misma en distintas horas del día. Cabe recalcar que los valores disponibles en MATLAB, son resultado del previo análisis del crecimiento poblacional, índice de penetración de cada servicio y situación geográfica y social de la provincia del Azuay, además del estudio técnico de cada uno de los

servicios; ampliamente detallado en el Capítulo 3. En el Anexo B se observa la interfaz gráfica creada en MATLAB.

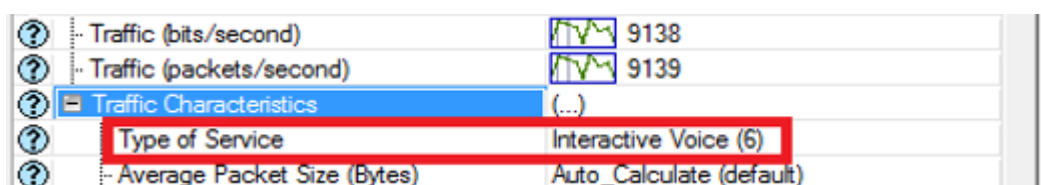
Una vez seleccionados todos los parámetros deseados por el administrador de la red, MATLAB genera un archivo *txt* con el cálculo del ancho de banda obtenido a partir de la información proporcionada por el administrador.

Este archivo queda a disposición para posteriormente ser leído y ejecutado por el *software* de simulación de redes OPNET. La información que contiene el archivo de texto, es el ancho de banda en cada uno de los enlaces, los intervalos de tiempo en los cursará dicho tráfico, el tráfico de cada uno de los servicios generado por cada una de las zonas seleccionadas.

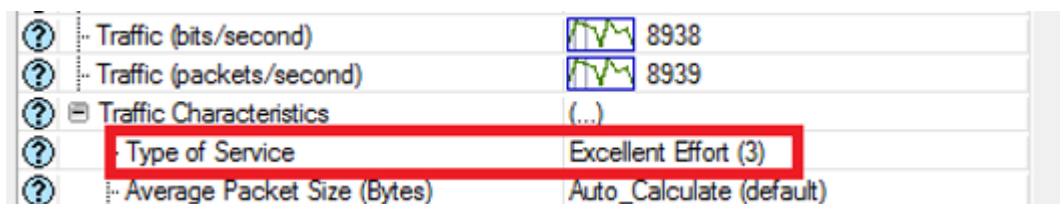
En OPNET, se selecciona el archivo generado por MATLAB, se importa y se configura la prioridad del tráfico según sea el servicio. A continuación, se exhibe dichas configuraciones de prioridad.



**Figura 4.16:** Diferenciación de Servicio para Internet



**Figura 4.17:** Diferenciación de Servicio para VoIP



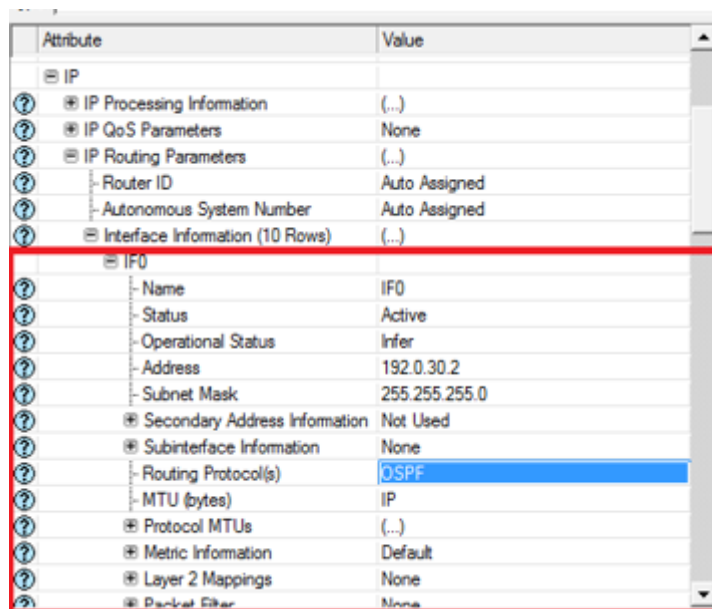
**Figura 4.18:** Diferenciación de Servicio para IPTV

Las configuraciones de las prioridades del tráfico se realizan una sola vez en un mismo archivo, es decir, el administrador puede usar la herramienta MATLAB varias veces para generar distinta cantidad de tráfico sin tener que configurar siempre las prioridades en el OPNET. Las prioridades del tráfico están asignadas en el siguiente orden: tráfico de voz, televisión e Internet.

### 4.3.2 Configuración de MPLS

Como se explicó en la sección 4.1.3 para la configuración de MPLS se utiliza el bloque de MPLS que viene implementado en OPNET. La red MPLS se compone de los *routers* LER de entrada y salida además de una capa media compuesta por LSR. La red MPLS se configura desde los LER de entrada los cuales convierten la información IP en tramas etiquetadas según el tipo de servicio.

La configuración MPLS está implementada en la capa núcleo, en cambio en la capa de distribución la configuración es mediante el protocolo OSPF. Cada *router* y equipo de la red debe tener una dirección IP, que lo identifique, ésta dirección es del tipo IPv4.



**Figura 4.19:** Configuración: direccionamiento IP, protocolo OSPF

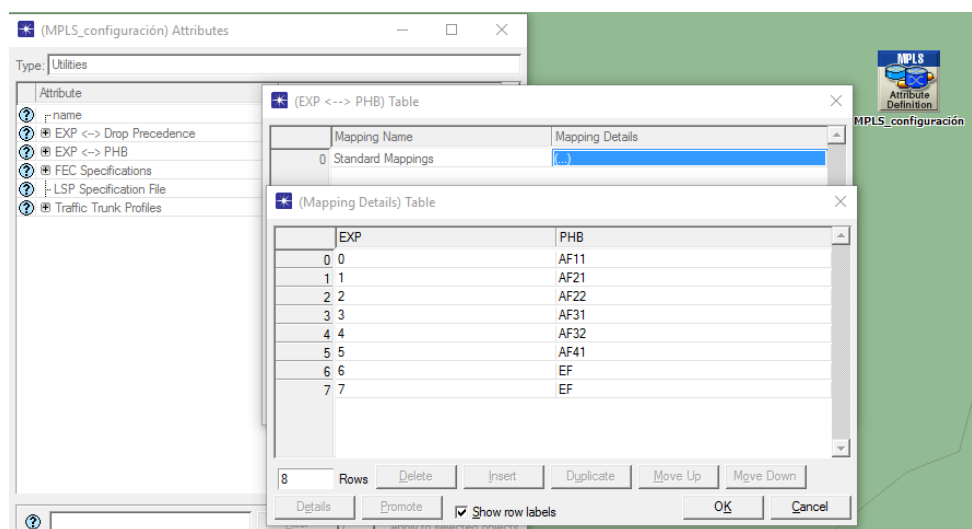
Además del direccionamiento el tráfico se clasifica y etiqueta de acuerdo con las políticas de tráfico configuradas.

El tráfico llega a cada nodo LER de entrada, donde el DSCP (Código DiffServ Point) asignado para cada servicio de *Triple Play* se asigna en la parte de la cabecera de MPLS que corresponde a los *bits* experimentales (EXP). Este proceso se conoce como DSCP a EXP.

El campo DSCP se relaciona con el ToS (Tipo de servicio), en donde para cada valor de DSCP en binario se asigna un tipo de servicio diferente. La siguiente Figura muestra el objeto de configuración de MPLS que es utilizado por OPNET Modeler para simular el DSCP a EXP mapeo. En la Figura 4.20 se observa esta configuración.

Después de los *bits* experimentales que se han establecido en la etiqueta MPLS, la decisión de envío dentro de la red se basa en las FEC (clases equivalentes de reenvío) que clasifica los paquetes en base a criterios específicos que incluyen:

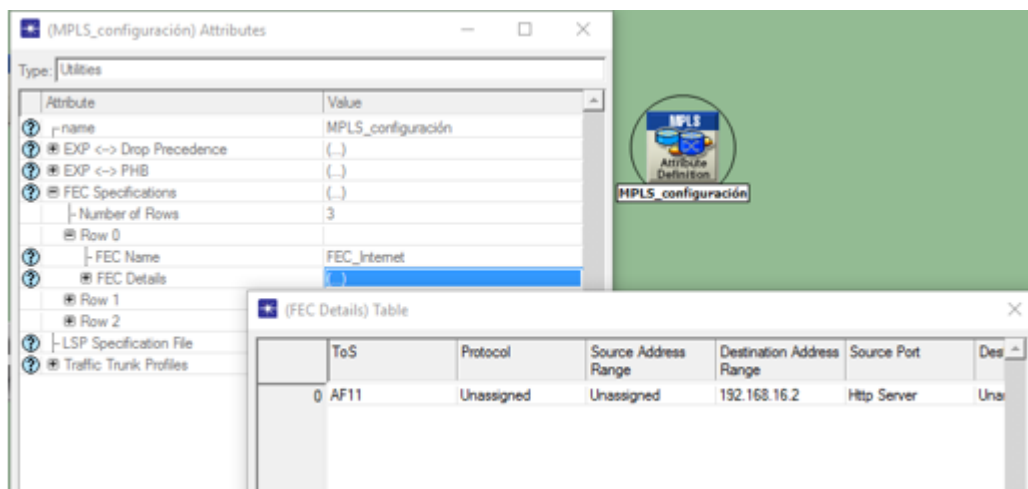
- Rango de dirección de origen
- Rango de direcciones de destino
- Tipo de servicio



**Figura 4.20:** Configuración MPLS: asignación de DSCP para diferenciación de servicios

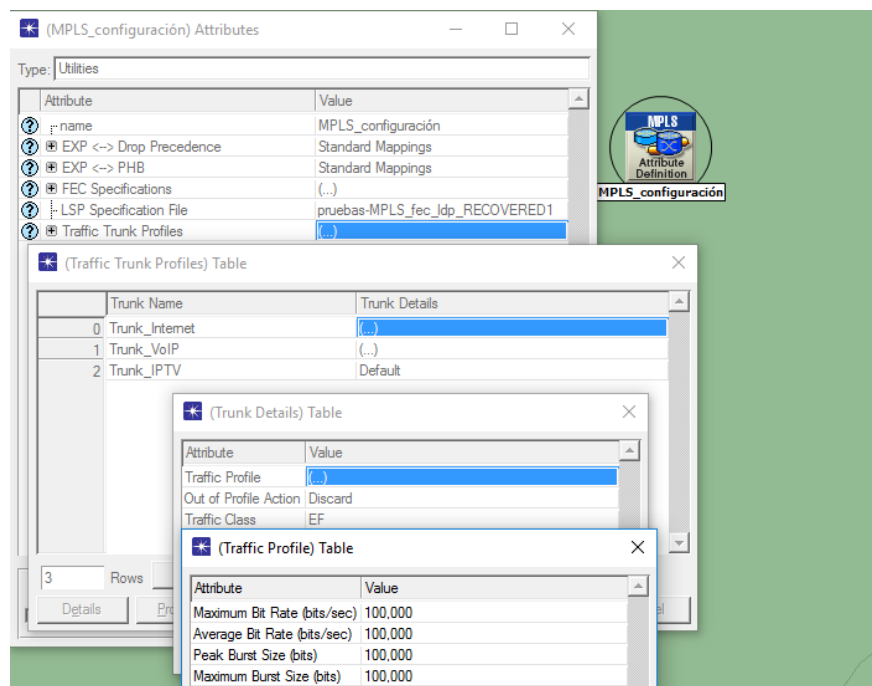
Después de configurar la FEC se asocia con el valor DSCP específico que se extrae del DSCP a EXP mapeo.





**Figura 4.21:** Configuración MPLS: configuración FEC para cada tipo de servicio de *Triple Play*

Los perfiles de tronco de tráfico son los diferentes flujos de tráfico que pertenecen a la misma FEC. Estos troncos de tráfico caracterizan principalmente a las FEC que se asignan en ellos. En estos se puede configurar diferentes características como son la tasa de datos.



**Figura 4.22:** Configuración MPLS: configuración tronco tráfico para diferentes FEC en la red

### 4.3.3 Configuración LSPs

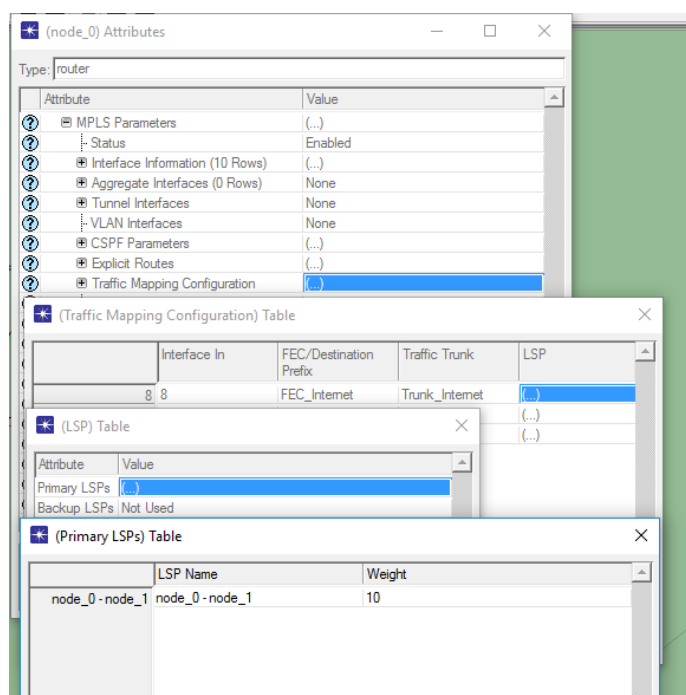
Después de realizar las anteriores configuraciones se asocia las diferentes LSP

a cada flujo de tráfico. El tráfico debe ser asociado con la trayectoria específica de conmutación de etiquetas (LSP) para ser transportado del nodo de entrada al nodo de salida, es decir, el trayecto que sigue el tráfico.

La asociación de tráfico a la LSP se lleva a cabo por el mapeo de la FEC a la LSP. La siguiente Figura presenta la configuración que asocia la FEC a la LSP.

El simulador de redes OPNET Modeler ofrece la posibilidad de crear LSPs estáticas y dinámicas. Al utilizar LSPs dinámicas el trabajo del administrador se ve simplificado, teniendo un bajo control sobre la red, mientras que, con el uso de LSPs estáticas el administrador puede controlar el flujo de paquetes que circula en la red teniendo que crear manualmente LSPs de *backup*.

LSP estáticas brindan el control sobre la red que se está implementando. Para este trabajo de investigación han sido usadas LSPs estáticas.



**Figura 4.23:** Configuración LSP para cada servicio de *Triple Play*

Se han creado distintas LSPs por cada una de las ocho zonas y en cada zona tres LSPs, una para cada servicio.

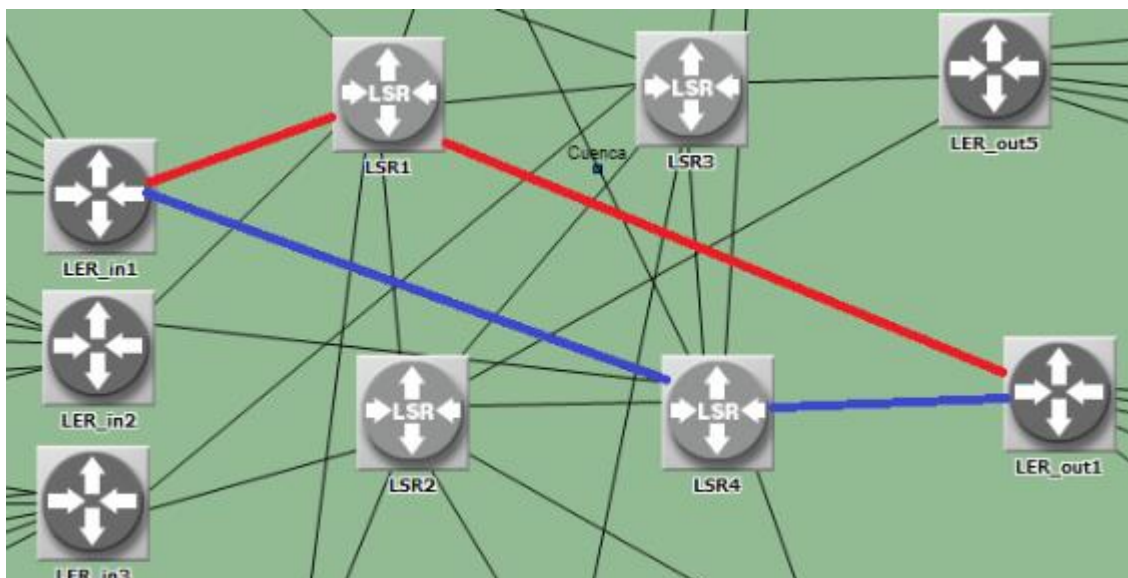
Las LSPs de *backup* han sido creadas con el objetivo de que, en caso de pérdida de un equipo o un enlace, el tráfico pueda seguir llegando a su destino, brindando

robustez y disponibilidad en la red.

Por cada una de las LSPs principales fluye el 90% del tráfico total de cada servicio en una determinada zona, mientras que por las LSPs de *backup*, fluye el 10% restante de dicho tráfico. De tal manera que, si se presenta un fallo en alguno de los equipos o enlaces perjudicando a la LSP principal, el enlace de *backup* recuperará el 100% del tráfico evitando así la pérdida de información. Por otro lado, si el enlace de *backup* se pierde será el enlace principal el que recupere todo el tráfico.

A continuación, se indican las rutas de las LSPs, tanto principales como de *backup*, usadas para este trabajo de investigación.

Lo que indican las tablas a continuación es la ruta que sigue cada una de las LSPs, por ejemplo, para el servicio de Internet de la zona 1: la LSP principal empieza en el LERin1, en donde se recibe el servicio, luego pasa por LSR4 y finalmente llega a su destino, LERout1. (Color azul, Figura 4.24). Esta LSP recibe el nombre de *LERin1-LERout1\_principal*. Para la LSP de *backup*, del mismo servicio y de la misma zona, empieza en LERin1, luego pasa por LSR1 y sale por LERout1. (Color rojo, Figura 4.24). Esta LSP recibe el nombre de *LERin1-LERout1\_backup*. Para observar las rutas de todas las LSP, revisar el gráfico de toda la red, Anexo A.



**Figura 4.24:** Lógica de cada ruta LSP en la red núcleo

La tabla de la izquierda indica las LSPs principales, mientras que, la de la derecha las de *backup* de cada una de las zonas.

Zona 1	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR4
LSR4	LERout1
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR4
LSR4	LERout1
<b>TV</b>	
LER in3	LSR2
LSR2	LSR4
LSR4	LERout1

Zona 2	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR4
LSR4	LERout2
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR4
LSR4	LERout2
<b>TV</b>	
LER in3	LSR3
LSR3	LSR4
LSR4	LERout2

Zona 3	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR1
LSR1	LSR2
LSR2	LERout3
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR1
LSR1	LSR2
LSR2	LERout3
<b>TV</b>	
LER in3	LSR2
LSR2	LERout3

Zona 4
--------

Zona 1	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR1
LSR1	LERout1
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR1
LSR1	LERout1
<b>TV</b>	
LER in3	LSR3
LSR3	LSR1
LSR1	LERout1

Zona 2	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR1
LSR1	LSR2
LSR2	LERout2
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR1
LSR1	LSR2
LSR2	LERout2
<b>TV</b>	
LER in3	LSR2
LSR2	LERout2

Zona 3	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR4
LSR4	LSR3
LSR3	LERout3
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR4
LSR4	LSR3
LSR3	LERout3
<b>TV</b>	
LER in3	LSR3
LSR3	LERout3

Zona 4
--------

<b>Internet</b>	
LER in1	LSR4
LSR4	LSR2
LSR2	LERout4
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR4
LSR4	LSR2
LSR2	LERout4
<b>TV</b>	
LER in3	LSR2
LSR2	LERout4

<b>Internet</b>	
LER in1	LSR1
LSR1	LERout4
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR1
LSR1	LERout4
<b>TV</b>	
LER in3	LSR3
LSR3	LSR1
LSR1	LERout4

<b>Zona 5</b>	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR4
LSR4	LSR3
LSR3	LERout5
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR4
LSR4	LSR3
LSR3	LERout5
<b>TV</b>	
LER in3	LSR3
LSR3	LERout5

<b>Zona 5</b>	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR1
LSR1	LSR2
LSR2	LERout5
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR1
LSR1	LSR2
LSR2	LERout5
<b>TV</b>	
LER in3	LSR2
LSR2	LERout5

<b>Zona 6</b>	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR1
LSR1	LSR2
LSR2	LSR3
LSR3	LERout6
<b>Voz</b>	
LER in1	LSR1
LSR1	LSR2
LSR2	LSR3
LSR3	LERout6
<b>TV</b>	
LER in3	LSR3
LSR3	LERout6

<b>Zona 6</b>	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR4
LSR4	LERout6
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR4
LSR4	LERout6
<b>TV</b>	
LER in3	LSR2
LSR2	LSR4
LSR4	LERout6

<b>Zona 7</b>	
---------------	--

<b>Zona 7</b>	
---------------	--

<b>Internet</b>	
LER in1	LSR1
LSR1	LERout7
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR1
LSR1	LERout7
<b>TV</b>	
LER in3	LSR3
LSR3	LSR1
LSR1	LERout7

<b>Internet</b>	
LER in1	LSR4
LSR4	LERout7
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR4
LSR4	LERout7
<b>TV</b>	
LER in3	LSR2
LSR2	LSR4
LSR4	LERout7

Zona 8	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR1
LSR1	LERout8
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR1
LSR1	LERout8
<b>TV</b>	
LER in3	LSR2
LSR2	LSR1
LSR1	LERout8

Zona 8	
<b>Internet</b>	
LER in1	LSR4
LSR4	LSR3
LSR3	LERout8
<b>Voz</b>	
LER in2	LSR4
LSR4	LSR3
LSR3	LERout8
<b>TV</b>	
LER in3	LSR3
LSR3	LERout8

**Tabla 4.2.** Rutas que siguen las LSPs tanto principal (izquierda), como de *backup* (derecha) en cada una de las zonas de la provincia del Azuay

A continuación, se presenta una tabla en donde se observan todos los enlaces de la red con los LSPs que pasan por ellos.

Nombre del enlace	LSPs
<b>LERin1-LSR1</b>	LERin1-LERout1_backup, LERin1-LERout2_backup, LERin1-LERout3_principal, LERin1-LERout4_backup, LERin1-LERout5_backup, LERin1-LERout6_principal, LERin1-LERout7_principal, LERin1-LERout8_principal
<b>LERin1-LSR4</b>	LERin1-LERout1_principal, LERin1-LERout2_principal, LERin1-LERout3_backup, LERin1-LERout4_principal, LERin1-LERout5_principal, LERin1-LERout6_backup, LERin1-LERout7_backup, LERin1-LERout8_backup
<b>LERin2-LSR1</b>	LERin2-LERout1_backup, LERin2-LERout2_backup, LERin2-LERout3_principal, LERin2-LERout4_backup, LERin2-LERout5_backup, LERin2-LERout6_principal, LERin2-LERout7_principal, LERin2-LERout8_principal

<b>LERin2-LSR4</b>	LERin2-LEROUT1_principal, LERin2-LEROUT2_principal, LERin2-LEROUT3_backup, LERin2-LEROUT4_principal, LERin2-LEROUT5_principal, LERin2-LEROUT6_backup, LERin2-LEROUT7_backup, LERin2-LEROUT8_backup
<b>LERin3-LSR3</b>	LERin3-LEROUT1_principal, LERin3-LEROUT2_principal, LERin3-LEROUT3_backup, LERin3-LEROUT4_backup, LERin3-LEROUT5_principal, LERin3-LEROUT6_principal, LERin3-LEROUT7_principal, LERin3-LEROUT8_backup
<b>LERin3-LSR2</b>	LERin3-LEROUT1_backup, LERin3-LEROUT2_backup, LERin3-LEROUT3_principal, LERin3-LEROUT4_principal, LERin3-LEROUT5_backup, LERin3-LEROUT6_backup, LERin3-LEROUT7_backup, LERin3-LEROUT8_principal
<b>LSR1-LSR2</b>	LERin2-LEROUT6_principal, LERin1-LEROUT6_principal, LERin2-LEROUT2_backup, LERin1-LEROUT2_backup, LERin2-LEROUT3_principal, LERin1-LEROUT3_principal, LERin2-LEROUT5_backup, LERin1-LEROUT5_backup, LERin3-LEROUT8_principal
<b>LSR1-LSR3</b>	LERin3-LEROUT1_backup, LERin3-LEROUT4_backup, LERin3-LEROUT7_principal
<b>LSR1-LSR4</b>	LERin2-LEROUT3_backup, LERin1-LEROUT3_backup, LERin2-LEROUT8_backup, LERin1-LEROUT8_backup, LERin2-LEROUT5_principal, LERin1-LEROUT5_principal, LERin3-LEROUT1_principal, LERin3-LEROUT2_principal
<b>LSR2-LSR4</b>	LERin3-LEROUT7_backup, LERin3-LEROUT6_backup, LERin2-LEROUT4_principal, LERin1-LEROUT4_principal
<b>LSR2-LSR3</b>	LERin3-LEROUT1_backup, LERin2-LEROUT6_principal, LERin1-LEROUT6_principal
<b>LSR4-LEROUT1</b>	LERin1-LEROUT1_principal, LERin2-LEROUT1_principal, LERin3-LEROUT1_principal
<b>LSR4-LEROUT2</b>	LERin1-LEROUT2_principal, LERin2-LEROUT2_principal, LERin3-LEROUT2_principal
<b>LSR2-LEROUT3</b>	LERin1-LEROUT3_principal, LERin2-LEROUT3_principal, LERin3-LEROUT3_principal
<b>LSR2-LEROUT4</b>	LERin1-LEROUT4_principal, LERin2-LEROUT4_principal, LERin3-LEROUT4_principal
<b>LSR3-LEROUT5</b>	LERin1-LEROUT5_principal, LERin2-LEROUT5_principal, LERin3-LEROUT5_principal
<b>LSR3-LEROUT6</b>	LERin1-LEROUT6_principal, LERin2-LEROUT6_principal, LERin3-LEROUT6_principal
<b>LSR1-LEROUT7</b>	LERin1-LEROUT7_principal, LERin2-LEROUT7_principal, LERin3-LEROUT7_principal
<b>LSR1-LEROUT8</b>	LERin1-LEROUT8_principal, LERin2-LEROUT8_principal, LERin3-LEROUT8_principal
<b>LSR1-LEROUT1</b>	LERin1-LEROUT1_backup, LERin2-LEROUT1_backup, LERin3-LEROUT1_backup
<b>LSR2-LEROUT2</b>	LERin1-LEROUT2_backup, LERin2-LEROUT2_backup, LERin3-LEROUT2_backup
<b>LSR3-LEROUT3</b>	LERin1-LEROUT3_backup, LERin2-LEROUT3_backup, LERin3-LEROUT3_backup
<b>LSR1-LEROUT4</b>	LERin1-LEROUT4_backup, LERin2-LEROUT4_backup, LERin3-LEROUT4_backup
<b>LSR2-LEROUT5</b>	LERin1-LEROUT5_backup, LERin2-LEROUT5_backup, LERin3-LEROUT5_backup
<b>LSR4-LEROUT6</b>	LERin1-LEROUT6_backup, LERin2-LEROUT6_backup, LERin3-LEROUT6_backup
<b>LSR4-LEROUT7</b>	LERin1-LEROUT7_backup, LERin2-LEROUT7_backup, LERin3-LEROUT7_backup
<b>LSR3-LEROUT8</b>	LERin1-LEROUT8_backup, LERin2-LEROUT8_backup, LERin3-LEROUT8_backup

**Tabla 4.3:** Enlaces de la red con las LSPs, tanto principal como de *backup*, que pasan por cada uno de ellos

#### 4.4 Elección del mejor mecanismo de gestión de colas y mejor protocolo

##### 4.4.1 Análisis y comparación de resultados entre protocolos IP, MPLS y MPLS-TE para cada uno de los servicios *Triple Play*

Para configurar la red con MPLS se ha comparado entre diferentes protocolos a fin de seleccionar el que brinde mejor resultados. Se ha configurado tres diferentes

escenarios: el primero se configura la red IP basado en el protocolo OSPF, el segundo se configura con MPLS y por último con MPLS-TE.

El objetivo de esta configuración es comprobar el rendimiento de MPLS frente a un protocolo IP convencional, además de comparar entre los protocolos MPLS cual tiene mejor desempeño

En esta sección el tráfico es de tipo explícito dado que para comprobar los diferentes protocolos no se utilizará la red con el tráfico calculado sino solo un porcentaje equivalente a 1% dado que el tiempo que se necesita para ejecutar la red completa sería elevado.

Para el tráfico explícito se necesita configurar en OPNET las diferentes aplicaciones, mismas que al ser parte del servicio *Triple Play*, serán de tres tipos, uno para voz, otro para televisión y otro para Internet. La diferencia entre las aplicaciones de tráfico está principalmente basada en el valor del ToS (Type of Service). Es necesario una diferenciación del tipo de tráfico para poder otorgar distintas prioridades a los flujos.

Mediante el bloque de aplicación se han definido los servicios *Triple Play*: Internet, voz y televisión, a cada uno de estos servicios se le ha designado una respectiva prioridad. A su vez cada aplicación ha sido asignada a un perfil, cada perfil implica un usuario o grupos de usuarios con similares características de consumo.

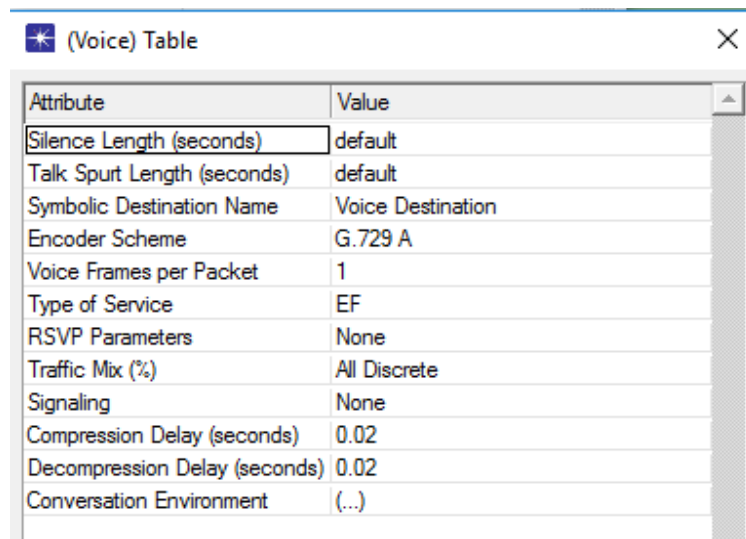
La clasificación del tráfico se puede implementar en la fuente de tráfico a través del bloque de definición de aplicación. El tráfico llega a cada uno de los LER de entrada, se clasifica y se asigna a la cola correspondiente de acuerdo con la prioridad establecida en el código de DiffServ Point (DSCP) dentro del campo ToS.

A continuación, se exhibe la configuración de la aplicación para cada servicio:

El tráfico de voz es el flujo al cual se le otorga una mayor prioridad, debido a que al ser en tiempo real los paquetes no se pueden perder ya que el interlocutor podría recibir un mensaje errado o incomprensible.

La prioridad que se le asigna al flujo de voz es Expedited Forwarding (*EF*). Además, se elige el códec G.729, como se definió en el Capítulo 3, se selecciona los valores de compresión y descompresión, y las tramas por paquete.





Attribute	Value
Silence Length (seconds)	default
Talk Spurt Length (seconds)	default
Symbolic Destination Name	Voice Destination
Encoder Scheme	G.729 A
Voice Frames per Packet	1
Type of Service	EF
RSVP Parameters	None
Traffic Mix (%)	All Discrete
Signaling	None
Compression Delay (seconds)	0.02
Decompression Delay (seconds)	0.02
Conversation Environment	(...)

**Figura 4.25:** Configuración servicio VoIP con tráfico explícito

El siguiente flujo en cuestión de asignación de prioridades es IPTV, ya que en este caso se podría perder algunos paquetes sin que afecte al usuario, esta pérdida de paquetes podría significar la pérdida de unos cuantos píxeles en la imagen, lo que es imperceptible para el ojo humano.

Sin embargo, tampoco se puede perder demasiada información ya que implicaría una degradación de la calidad de la imagen o congelamiento del video. La prioridad que se asigna es *Assured Forwarding* 41.

Para calcular el ancho de banda para un canal, ya sea HD o SD, se necesita seleccionar el tamaño y el tiempo de la trama. El producto entre estas nos dará el ancho de banda necesario para simular la tasa de transmisión del canal.

Dicho cálculo se realiza a continuación:

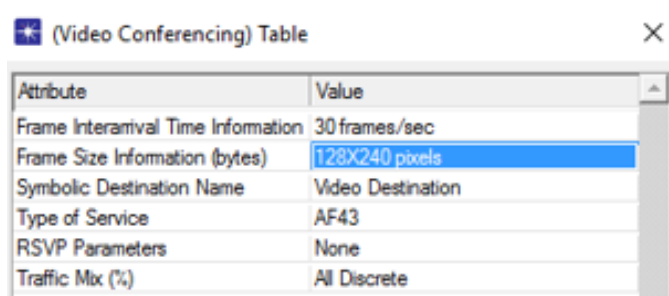
***Para un canal HD:***

Tamaño trama: 128 x 240 píxeles=30720 píxeles.

Tiempo trama=30 tramas/seg.

Ancho banda (*bytes*)= Tamaño trama\* Tiempo trama=921600

Ancho de banda (*bites*)=**7,372 Mbps**



Attribute	Value
Frame Interarrival Time Information	30 frames/sec
Frame Size Information (bytes)	128X240 pixels
Symbolic Destination Name	Video Destination
Type of Service	AF43
RSVP Parameters	None
Traffic Mix (%)	All Discrete

**Figura 4.26:** Configuración canal SD para el servicio IPTV con tráfico explícito

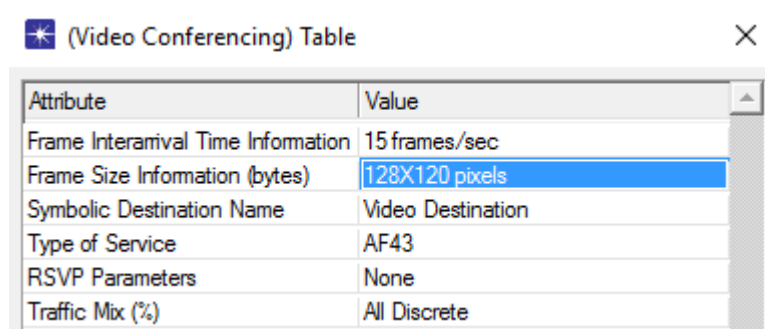
**Para un canal SD:**

Tamaño trama: 128x120 píxeles=15360 píxeles.

Tiempo trama=15 tramas/seg

Ancho banda (bytes)= Tamaño trama\* Tiempo trama=230400

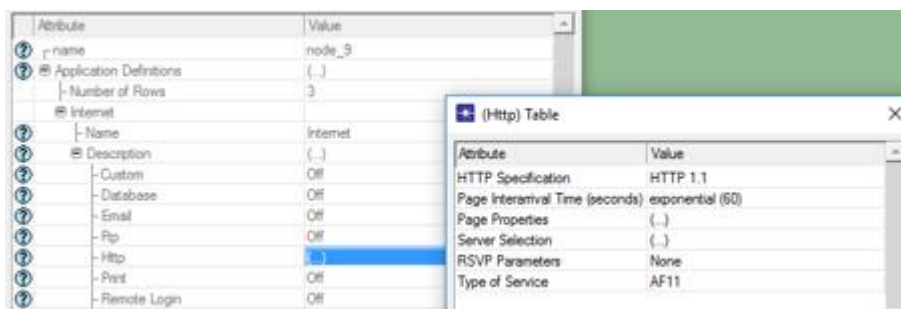
Ancho de banda (bites)=**1,843 Mbps**



Attribute	Value
Frame Interarrival Time Information	15 frames/sec
Frame Size Information (bytes)	128X120 pixels
Symbolic Destination Name	Video Destination
Type of Service	AF43
RSVP Parameters	None
Traffic Mix (%)	All Discrete

**Figura 4.27:** Configuración canal HD para el servicio IPTV con tráfico explícito

El último flujo en la escala de prioridades es el tráfico de Internet, ya que si en el peor de los casos la pérdida de paquetes es excesiva se puede solicitar fácilmente un reenvío de información. La prioridad que se asigna al tráfico de Internet es *Assured Forwarding AF11*.



Attribute	Value
Name	node_9
Application Definitions	(...)
Number of Rows	3
Internet	
Name	Internet
Description	(...)
Custom	Off
Database	Off
Email	Off
Ptp	Off
Http	Off
Print	Off
Remote Login	Off

Attribute	Value
HTTP Specification	HTTP 1.1
Page Interarrival Time (seconds)	exponential (60)
Page Properties	(...)
Server Selection	(...)
RSVP Parameters	None
Type of Service	AF11

**Figura 4.28:** Configuración servicio Internet con tráfico explícito

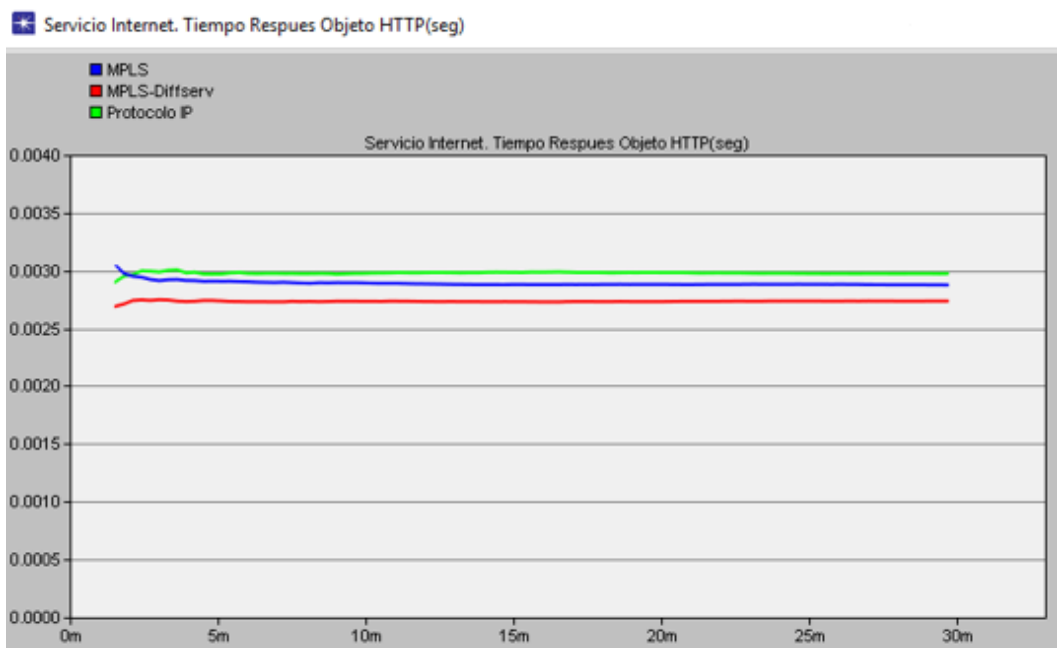
Todos los valores definidos en la configuración de cada servicio se corresponden a los definidos en el capítulo 3.

#### 4.3.1.1 Servicio de Internet

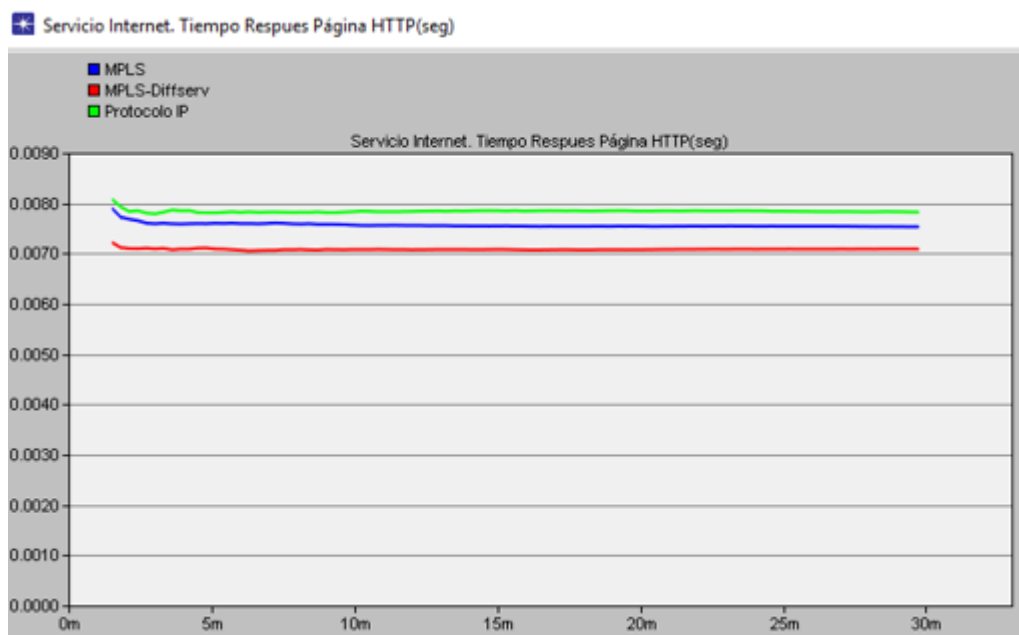
A continuación, se muestran los resultados del tiempo de respuesta a una solicitud HTTP utilizando cada uno de los tres protocolos.

Como se puede observar, la curva de color rojo perteneciente a MPLS-TE, es la que presenta una mejor respuesta con un menor tiempo de retardo, seguida del protocolo MPLS (curva color azul) y por último el protocolo IP (curva color verde).

Las Figuras representan en el eje x el tiempo de simulación del escenario para este caso de 30 min, y en el eje y representa en la primera Figura el tiempo de respuesta de un objeto en una página HTTP en segundos, en el caso de la segunda Figura representa el tiempo de respuesta de una página HTTP en segundos.



**Figura 4.29:** Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro *Object response time* para HTTP en segundos. Servicio de Internet.



**Figura 4.30:** Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro Respuesta Tiempo Página HTTP en segundos. Servicio de Internet

Por las gráficas anteriormente observadas se puede concluir que para el servicio de Internet el protocolo MPLS-TE presenta una mejor respuesta, convirtiéndolo en el protocolo con mejores prestaciones.

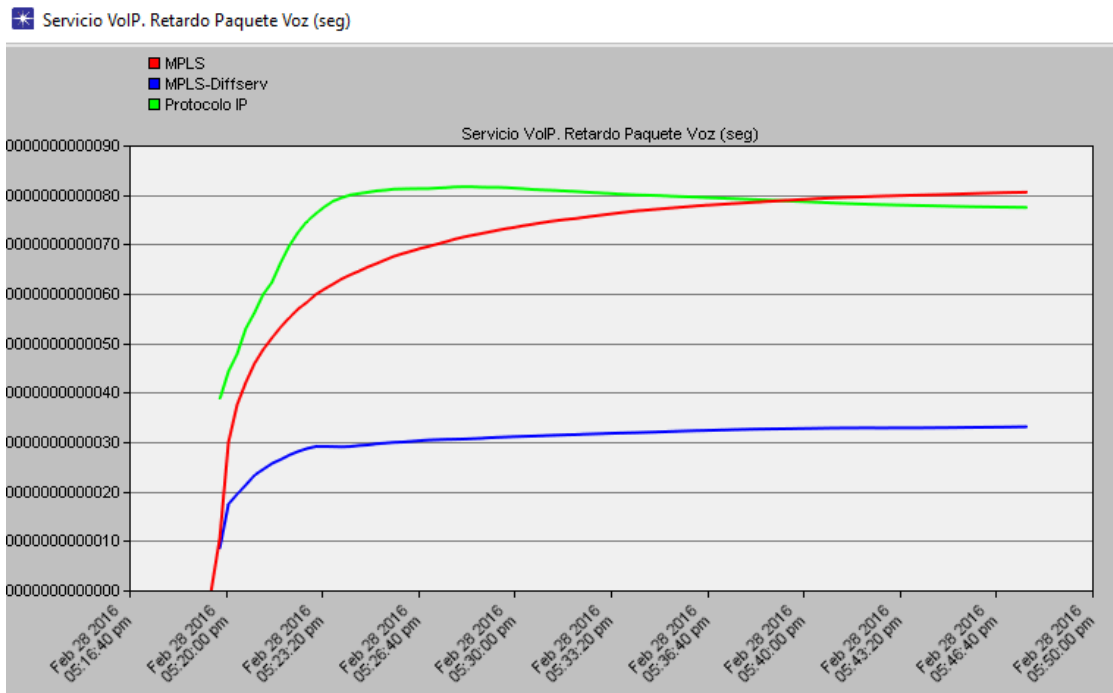
#### 4.3.1.2 Servicio de Telefonía

En las gráficas siguientes se observa el retardo de los paquetes del servicio de telefonía en la línea del tiempo.

Se puede observar que el protocolo con menor retardo en los paquetes es el protocolo MPLS-TE (curva color azul), seguido de MPLS (curva color rojo) y por último el protocolo IP (curva color verde).

La Figura 4.31 representa en el eje x el tiempo de simulación del escenario para este caso de 30 min, y en el eje y representa el retardo de los paquetes de voz en la escala de segundos.

Por las gráficas anteriormente observadas se puede concluir que para el servicio de telefonía el protocolo MPLS-TE presenta una mejor respuesta, convirtiéndolo en el protocolo con mejores prestaciones.



**Figura 4.31:** Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro Retardo de paquetes. Servicio VoIP

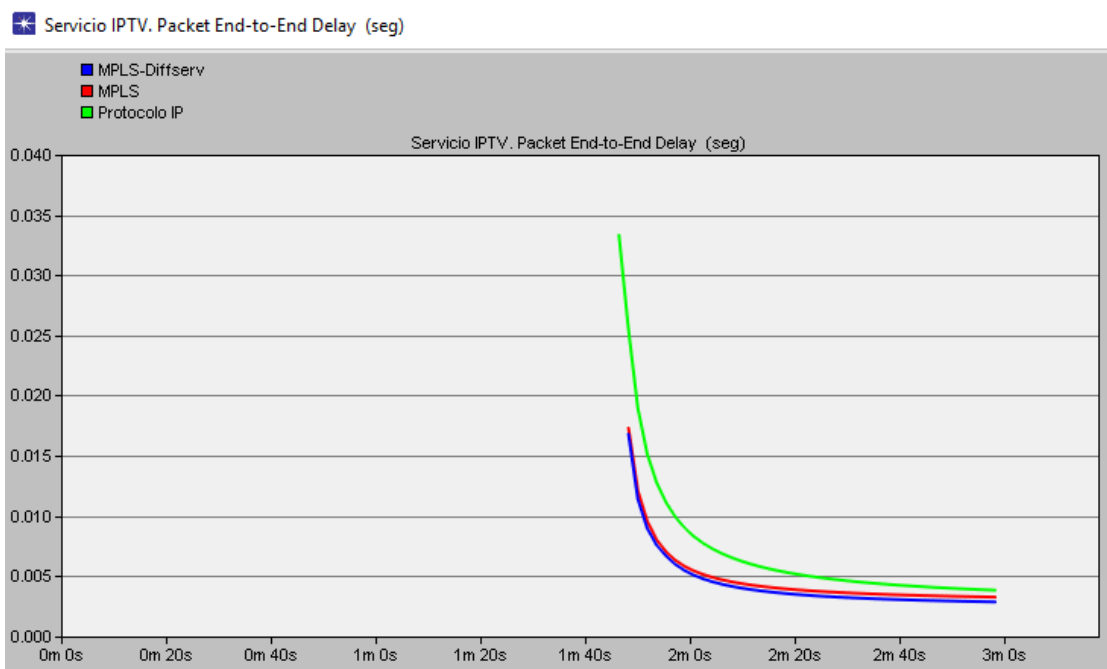
#### 4.3.1.3 Servicio de Televisión

A continuación, se exponen las Figuras 4.32 y 4.33 la mismas que muestran el retardo de los paquetes del servicio de IPTV.

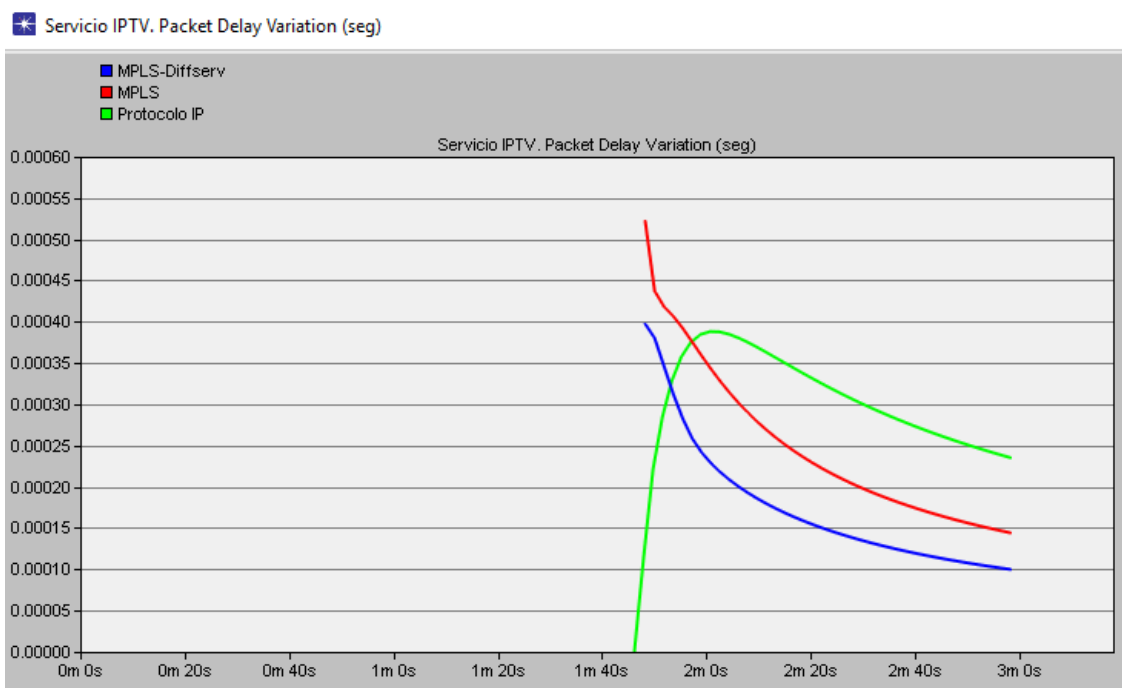
Se puede observar que el protocolo que presenta un menor retardo en los paquetes es el protocolo MPLS-TE (curva color azul), seguida de MPLS (curva color rojo) y por último el protocolo IP (curva color verde).

Las Figuras 4.32 y 4.33 representan en el eje x el tiempo de simulación del escenario para este caso de 3 min, y en el eje y representa para la primera figura el retardo *Packet end-to-end delay* en segundos y para la segunda figura el retardo de los paquetes de televisión (audio, video) en la escala de segundos.

Por las gráficas observadas se puede concluir que para el servicio de televisión el protocolo MPLS-TE presenta una mejor respuesta, convirtiéndolo en el protocolo con mejores prestaciones.



**Figura 4.32:** Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro Packet end-to-end delay. Servicio IPTV



**Figura 4.33:** Comparación escenario IP, MPLS, MPLS-TE. Parámetro Retardo de Paquetes. Servicio IPTV

#### 4.4.2 Análisis y comparación de mecanismos de gestión de colas

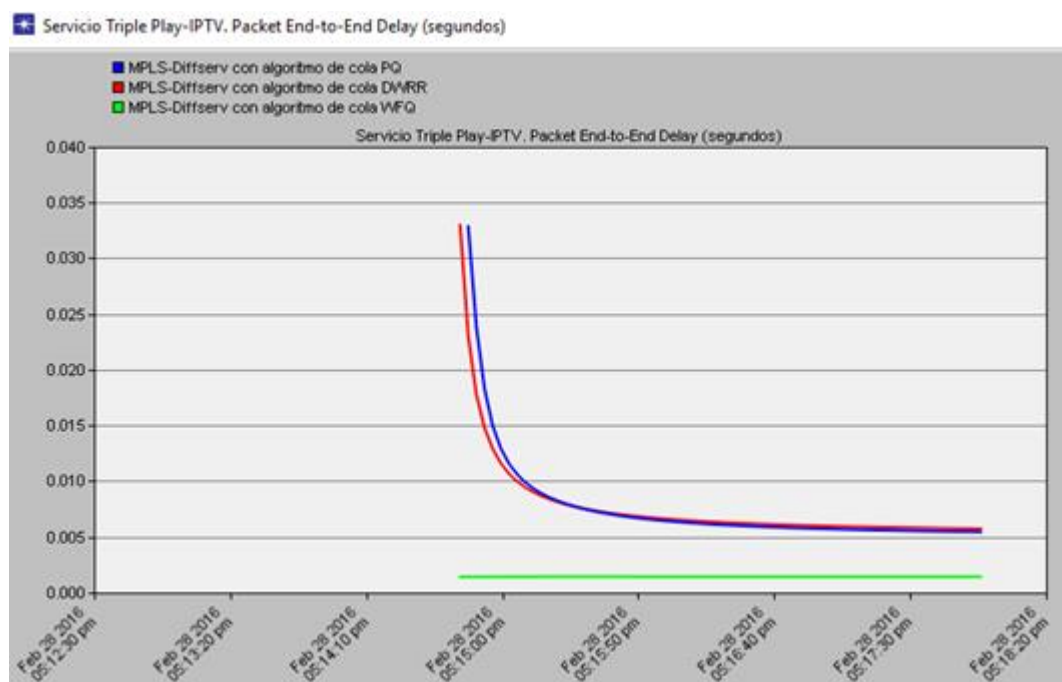
En las siguientes figuras se analiza el comportamiento de *Triple Play* con diferentes algoritmos de colas con el objetivo de seleccionar la cola que presente el mejor comportamiento, los servicios analizados son el de IPTV y VoIP dado que estos son los de mayor prioridad en términos de calidad de servicio.

En la Figura 4.34 se muestra la comparación del escenario MPLS- DiffServ para diferentes algoritmos de colas para el servicio IPTV

Se observa la comparación entre los algoritmos PQ, DWRR y WFQ el fundamento teórico de los mismos se definió en el Capítulo 2 en la sección de colas (2.1.10), la elección de los algoritmos se basó en el soporte que brinda OPNET para gestión de colas, además de que los algoritmos seleccionados son los más importantes para el análisis de ingeniería de tráfico.

La figura muestra que el mejor algoritmo de gestión de colas es el algoritmo WFQ pues presenta una mejor respuesta frente al retardo de los paquetes de extremo a extremo, en la figura el eje x representa el tiempo de simulación (5 min), en cambio el eje y representa el retardo de paquetes en segundos.

La curva en rojo representa la cola DWRR esta es la de peor rendimiento, en azul se muestra la cola PQ que tiene un rendimiento medio y en verde se representa la cola WFQ que muestra el mejor rendimiento con una respuesta en el orden de los mseg.



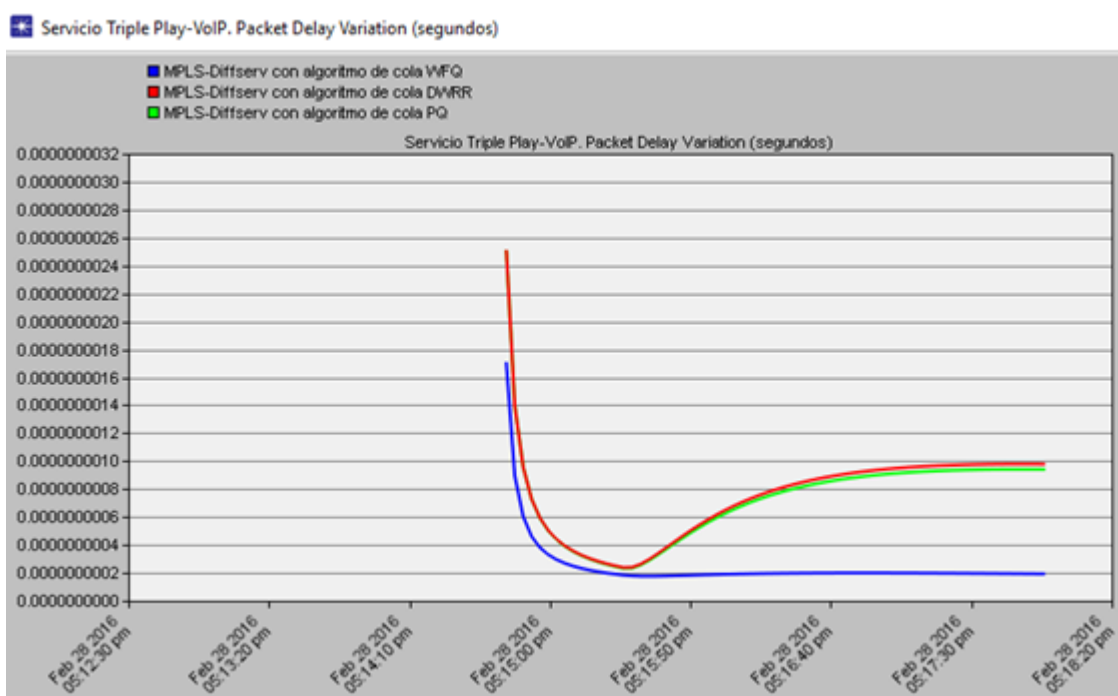
**Figura 4.34:** Comparación entre diferentes algoritmos de colas. Rojo-cola DWRR, Azul cola PQ, Verde cola WFQ. Parámetro analizado Retardo End-End de paquetes

para el servicio IPTV

En la Figura 4.35 se muestra la comparación del escenario MPLS- DiffServ para diferentes algoritmos de colas para el servicio VoIP. Al igual que en la Figura 4.34 se realiza la comparación entre los algoritmos de colas PQ, DWRR y WFQ.

La figura muestra que el mejor algoritmo de gestión de colas es el algoritmo WFQ pues presenta una mejor respuesta frente al retardo de los paquetes de voz, en la figura el eje x representa el tiempo de simulación (5 min), en cambio el eje y representa el retardo de paquetes en segundos.

La curva en rojo representa la cola DWRR ésta es la de peor rendimiento, en verde se muestra la cola PQ que tiene un rendimiento medio y en azul se representa la cola WFQ que muestra el mejor rendimiento con una respuesta en el orden de los 2 microsegundos.



**Figura 4.35:** Comparación entre diferentes algoritmos de colas. Rojo-cola DWRR, Verde cola PQ, Azul cola WFQ. Parámetro analizado Retardo de paquetes para el servicio VoIP

Como se ha observado en los resultados, la mejor solución para el escenario de la red núcleo es cuando se configura el protocolo MPLS-TE que implica MPLS con ingeniería de tráfico y diferenciación de servicios.



Además, dentro de la ingeniería de tráfico se ha seleccionado la cola WFQ por ser la que presenta una mejor respuesta en cuanto al tiempo de transmisión de los servicios del *Triple Play*. De igual forma el escenario de la red tendrá implementado la cola WFQ.

#### **4.5 Análisis de los resultados**

El primer escenario de simulación realizado corresponde al creado a partir del diseño de red ampliamente estudiado en el Capítulo 3, el mismo se puede revisar en la Figura A.1, Anexo A. Posteriormente, este escenario será referido como escenario base.

Para el análisis de los resultados, en primera instancia, se trabaja con el escenario base, exhibiendo su comportamiento cuando la red se encuentra en un estado completamente operativo y cuando pierde ciertos enlaces o nodos, comprobando así la robustez y disponibilidad de la red. Además, se estudiará el comportamiento de la red ante la fluctuación de tráfico existente en un día.

Ante la creciente demanda de los servicios, se plantea el envío de un tráfico superior al utilizado para dimensionar el escenario base, situación en la cual la red se enfrenta a un problema de sub-dimensionamiento, dando paso a la creación de un segundo escenario con mayores prestaciones, capaz de soportar el nuevo tráfico de la red.

Por otra parte, ante el supuesto caso de que los servicios ofertados tuvieran menos acogida de lo esperado, la red base se enfrenta ante un sobredimensionamiento, para lo cual se ha creado un tercer escenario, con los equipos suficientes para brindar los servicios de un plan básico.

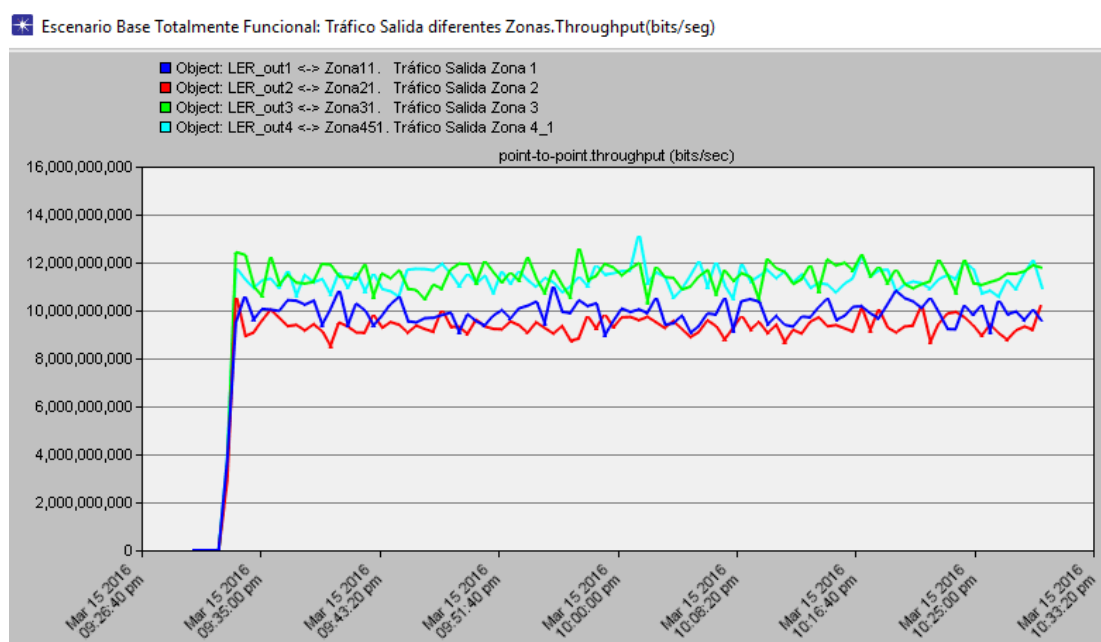
##### **4.5.1 Escenario base totalmente funcional**

El escenario base se encuentra en estado completamente operativo. Se ha utilizado el programa realizado en MATLAB como herramienta para la creación del tráfico. (Revisar 4.3.1). Los parámetros que se han usado son los definidos en el Capítulo 3 en la parte de diseño; para el servicio de Internet, se utiliza el plan de 6.1 Megas, para voz, se selecciona el códec G.729 con una duración de llamada promedio de 4 minutos, en cuanto a televisión, se usa MPEG4 y un plan medio, correspondiente

a 12 Megas. Revisar Anexo B.

Como ya se había definido en el capítulo 3, la red tiene ocho LERs de salida, uno por cada zona, excepto para la zona 4, Cuenca, la cual tiene cinco LERs. Cada uno de los ocho LERs de salida, está conectado a cinco *routers*, los cuales pertenecen a la capa de distribución. (Figura 4.13).

En la gráfica a continuación se observa el *throughput* en cada uno de los enlaces de salida, basado en los resultados se puede observar que el tráfico de salida es el mismo que el tráfico de entrada. El tráfico que se observa en la gráfica pertenece al tráfico de salida a uno de los cinco *routers* de distribución de cada uno de los LERs de salida. Como se mencionó, el tráfico de la zona 4 se envía por cinco LERs de salida, en la gráfica se observa solo uno de los cinco ya que el tráfico ha sido equitativamente repartido entre ellos. El valor de las curvas es aproximado entre ellas debido al balanceo de carga.



**Figura 4.36:** *Throughput* en cada uno de los enlaces de salida hacia la capa de distribución. Zona 4 está representada por una sola curva, ya que tráfico en todos sus LERs equitativo

#### 4.5.2 Tráfico a lo largo del día en escenario base

Este escenario analiza el total de tráfico que circula a lo largo de un día en la red base, además señala el porcentaje de ocupación de los enlaces.

La medición del tráfico representado por el *throughput* se realiza en los enlaces de salida hacia cada LER\_out es decir en cada uno de los ocho LER de salida. Las gráficas toman en cuenta la salida del enlace principal omitiendo la salida en el enlace de *backup*, dado que se considera que al circular el 90% de tráfico por el enlace principal los resultados serán adecuados para conocer el comportamiento de la red.

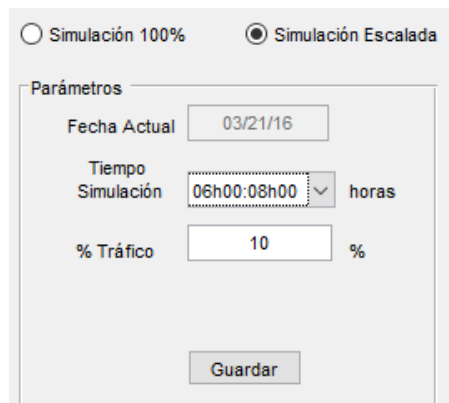
El porcentaje de utilización permite conocer cuán saturado se encuentra el enlace según su capacidad. Los enlaces que se analizan son los siguientes:

Enlaces Analizados	
LSR1-LER_out8	LSR1-LER_out7
LSR2-LER_out4	LSR3-LER_out6
LSR4-LER_out1	LSR4-LER_out2
LSR2-LER_out3	LSR3-LER_out5

**Tabla 4.4:** Enlaces analizados para el caso de tráfico a lo largo del día en escenario base

Para el caso de la Zona 4 que está dividida en 5 LER de salidas (4-8), se analiza sólo un caso, dado que al estar distribuido el tráfico equitativamente en cada uno se evalúa solo uno como referencia de los demás, la distribución de tráfico se detalló en el Capítulo 3.

En MATLAB se ha configurado el tráfico a lo largo de un día, para cada zona y tomando en cuenta los suscriptores para el año 2020, estos valores se comparan con el total de tráfico es decir con la red 100% operativa.



**Figura 4.37:** Configuración MATLAB tráfico a lo largo de un día en el escenario **base**

El porcentaje de generación del tráfico a lo largo de un día ha sido tomado basado en las características de consumo de los suscriptores residenciales, en donde en la mañana se asume un consumo menor, en la tarde un consumo medio y en la noche un consumo alto.

Mañana:	% Utilización de los suscriptores:
06h00-08h00	20
08h00-10h00	40
10h00-12h00	40

Tarde:	% Utilización de los suscriptores:
12h00-14h00	50
14h00-16h00	50
16h00-18h00	60

Noche:	% Utilización de los suscriptores:
18h00-20h00	70
20h00-22h00	80
22h00-00h00	80

**Tabla 4.5:** Porcentaje utilización de los suscriptores del servicio *Triple Play*

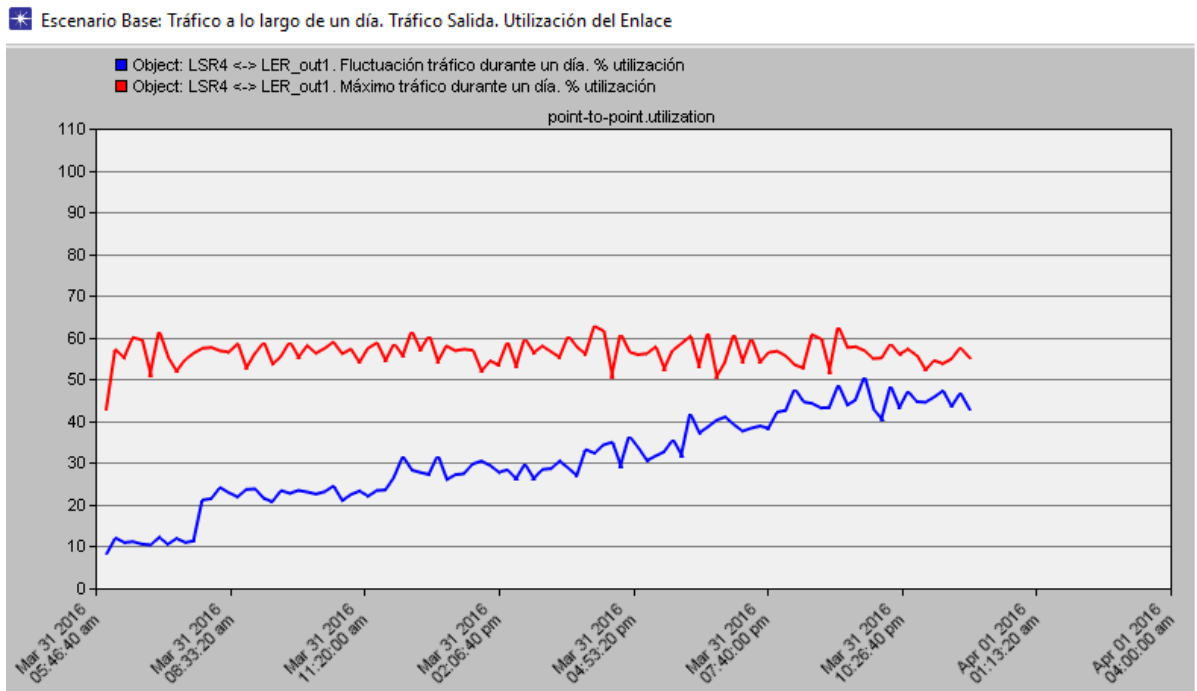
En la Figura 4.38 se observa para enlace LSR4-LERout1 el porcentaje de utilización, en rojo se muestra un promedio de 70% de utilización cuando por el enlace pasa todo el tráfico calculado para la zona (valor calculado en la sección 4.5.1).

En cambio, el tráfico a lo largo de un día muestra que el enlace se ocupa desde un 10% en horas de la mañana que el consumo de los servicios es menor a un 50 % en horas de la noche en el que el consumo es mayor.

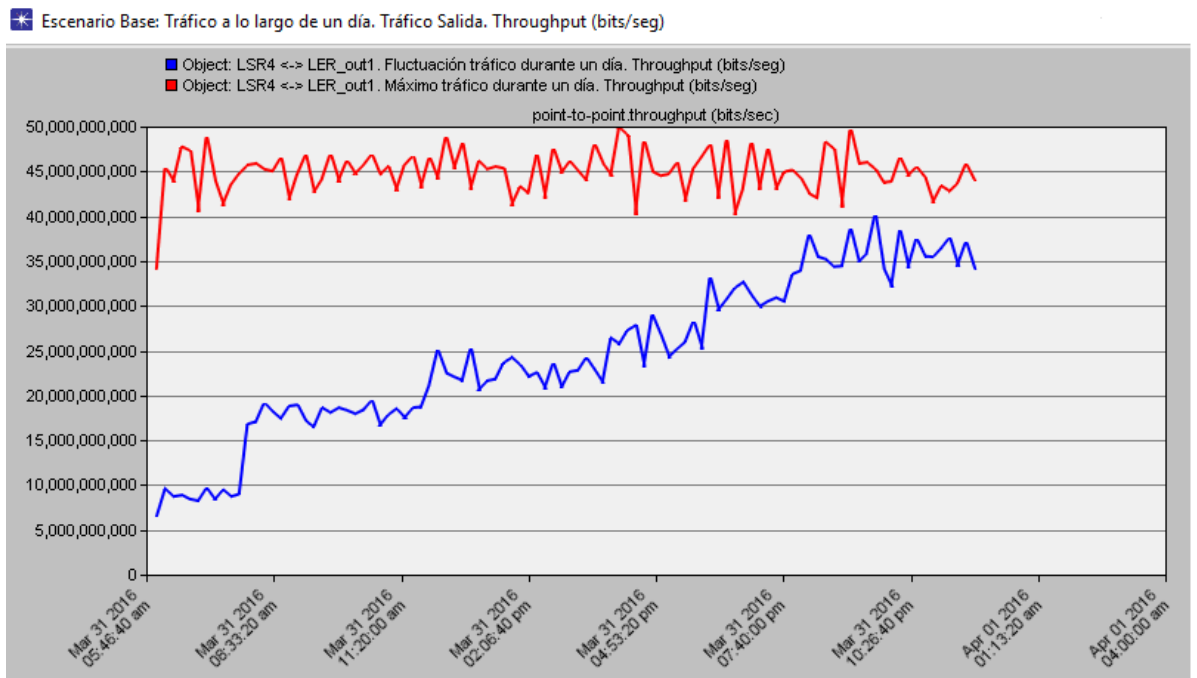
Se observa que la capacidad del enlace es suficiente para la proyección de tráfico a lo largo de un día. Los enlaces están diseñados de tal manera que si se encuentran con el escenario de mayor tráfico este no esté ocupado completamente, esto evita causar pérdidas por el enlace, manteniendo los retardos en límites adecuados para mantener la calidad del servicio.

La Figura 4.39 muestra en azul el tráfico a lo largo de un día, este hace referencia al tráfico que cursa por el enlace LSR4-LERout1, se observa que la carga en la mañana

es de aproximadamente 10 Gbps, conforme avanza el día el tráfico aumenta



**Figura 4.38:** Escenario base: Comparación de la Utilización del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR4-LEROUT1



**Figura 4.39:** Escenario base: Comparación del *Throughput* del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR4-LEROUT1

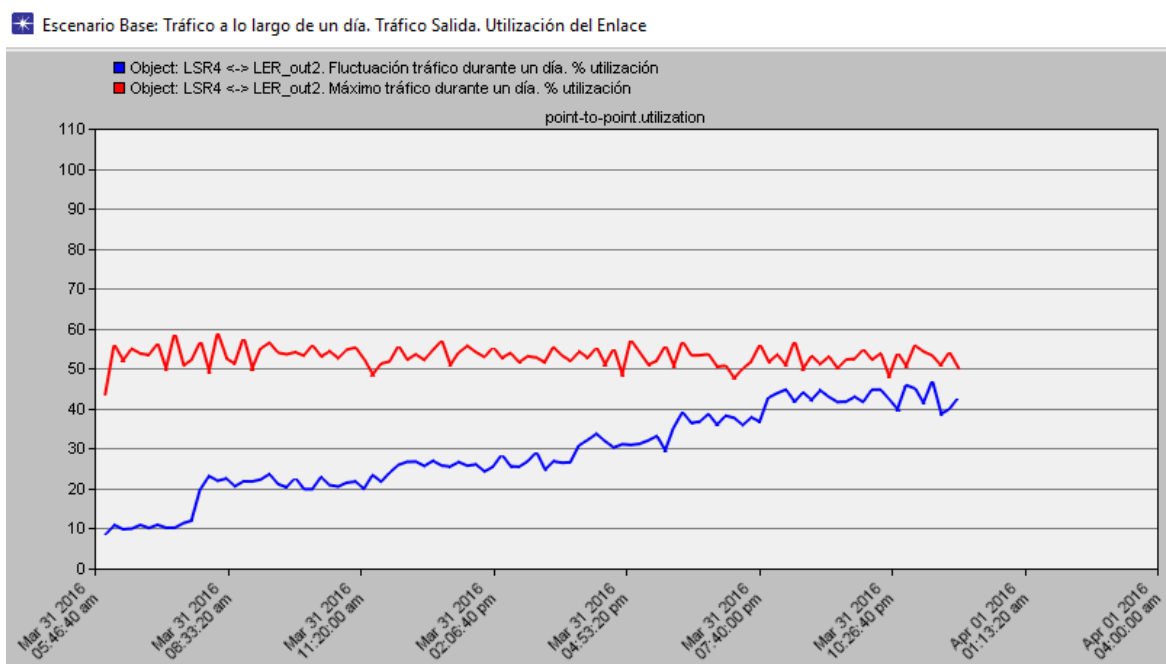
a 30 Gbps en la tarde y a 45 Gbps en la noche, esto demuestra que la red se encuentran con mayor congestión en horas de la noche comparado con el resto del día.

En rojo se observa el máximo de tráfico calculado para los suscriptores de la zona aproximadamente 55 Gb.

El tráfico fluctúa en valores inferiores a los máximos, lo que muestra que la red no debe presentar ningún inconveniente en su funcionamiento, además se resalta que en horas de la noche es cuando se debe garantizar el servicio.

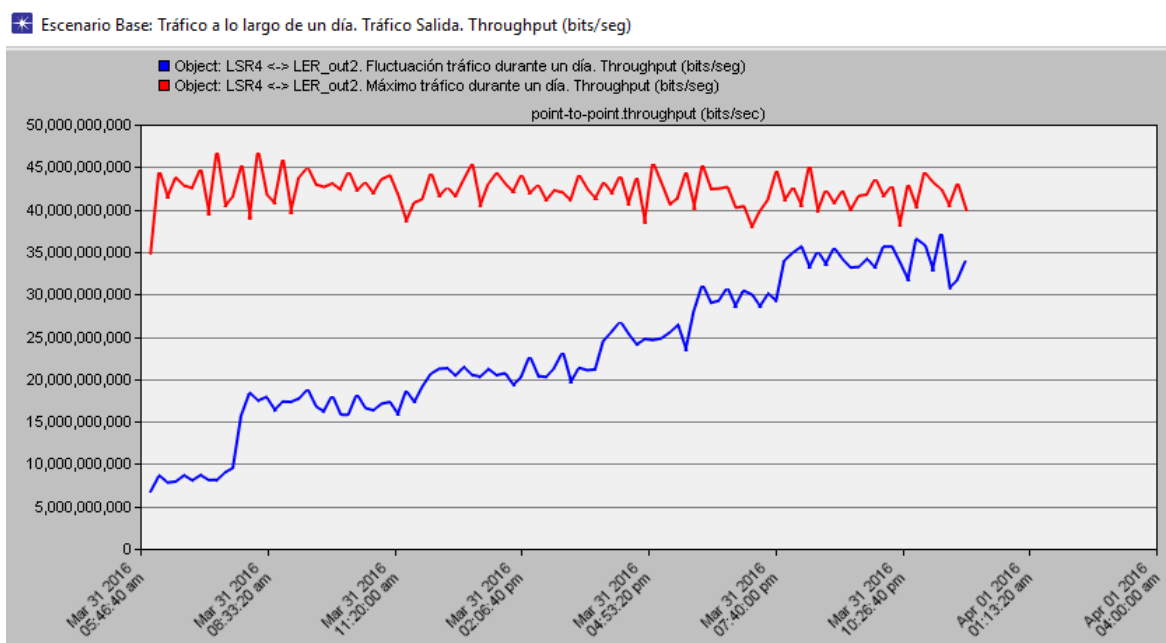
En el enlace LSR4-LER\_out2 se observa el comportamiento del tráfico del servicio *Triple Play* que llega a la zona 2, en la siguiente Figura se detalla en rojo el porcentaje de utilización cuando el enlace es ocupado con el total del tráfico calculado para la zona 65 % aproximadamente, este valor se puede constatar en el punto 4.5.1, en cambio en el tráfico a lo largo de un día el enlace se ocupa desde un 10% hasta un 50%.

Se detalla que la capacidad del enlace no se satura, por lo que la información que es transmitida mantiene una adecuada calidad de la señal.



**Figura 4.40:** Escenario base: Comparación de la Utilización del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR4-LERout2

En términos del *throughput* se observa que el valor máximo de tráfico del servicio *Triple Play* hacia la zona 2 es de 50 Gb (curva roja), en cambio en la curva azul se observa el tráfico a lo largo de un día con la red fluctuando entre 10 Gb a 40 Gb según sea el porcentaje de consumo de la red. El valor de *throughput* se mantiene bajo la capacidad total del enlace, por lo que el retardo que se genere mantendrá la calidad de la señal.



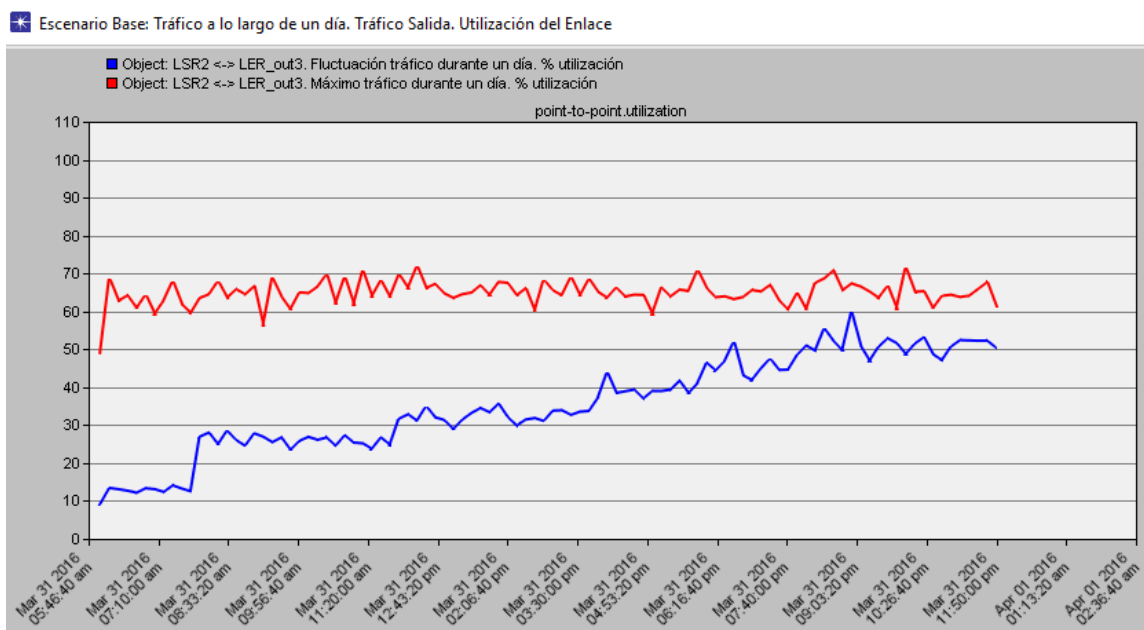
**Figura 4.41:** Escenario base: Comparación del *Throughput* del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR4-LERout2

En el enlace LSR2-LER\_out3 se maneja el tráfico del servicio *Triple Play* que llega a la zona 3, este valor se puede constatar en la tabla respectiva del escenario base cuando la red está completamente funcional (4.5.1). En la Figura 4.42 se detalla en rojo el porcentaje de utilización cuando el enlace es ocupado por todos los usuarios calculados para la zona es decir 62% aproximadamente, en cambio para la ocupación del enlace a lo largo de un día se tiene un porcentaje desde un 10% hasta un 55%.

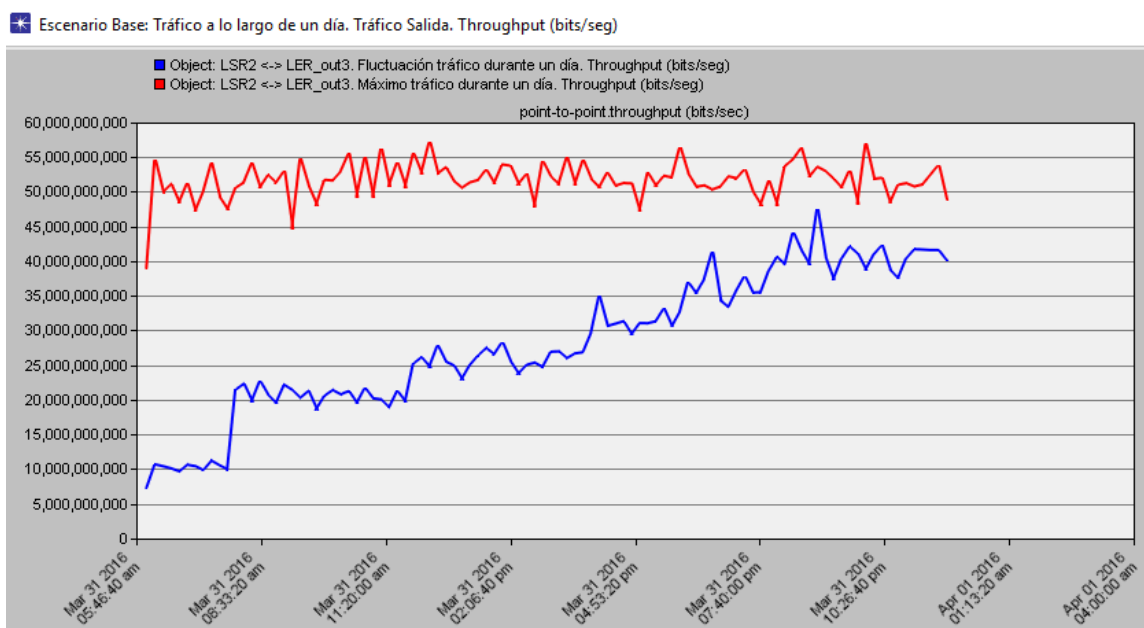
Se concluye que la capacidad del enlace no se satura, por lo que la información que es transmitida mantiene una adecuada calidad de la señal.

En términos del *throughput* se observa en la Figura 4.43 que el valor máximo de tráfico del servicio *Triple Play* hacia la zona 3 es de 55 Gb (curva roja), en cambio en la curva azul se observa el tráfico a lo largo de un día con la red fluctuando entre 15 Gb a 45 Gb con un consumo mayor en la noche y menor en el día.

El valor de *throughput* se mantiene menor a la capacidad total del enlace, por lo que el retardo que se genere mantendrá una adecuada calidad de la señal.



**Figura 4.42:** Escenario base: Comparación de la Utilización del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR2-LERout3



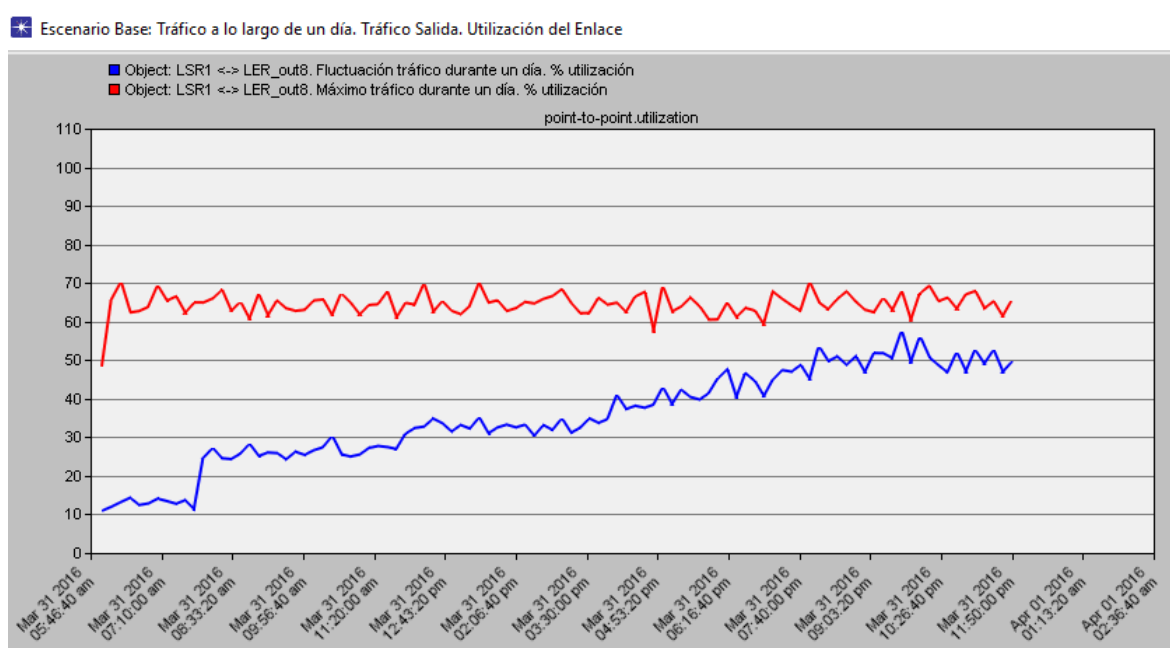
**Figura 4.43:** Escenario base: Comparación del *Throughput* del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR2-LERout3



Para el análisis en la zona 4 se toma en cuenta sólo un enlace como se explicó anteriormente, el enlace corresponde a la descripción es LSR1-LER\_out8 que transmite el tráfico del servicio *Triple Play* hacia la zona 4 en el sector 4\_1, el tráfico total para la zona se observa en la tabla generada por el MATLAB detallada en el primer escenario (4.5.1).

En la Figura 4.44 que se muestra a continuación se detalla en rojo la curva que representa el porcentaje de utilización cuando el enlace es ocupado por todos los usuarios calculados para la zona es decir 70 % aproximadamente, en cambio para la ocupación del enlace a lo largo de un día se tiene un porcentaje desde un 10% hasta un 55%.

Se observa que la utilización del enlace se encuentra dentro de los límites que permite mantener una adecuada calidad de la señal de la información transmitida.

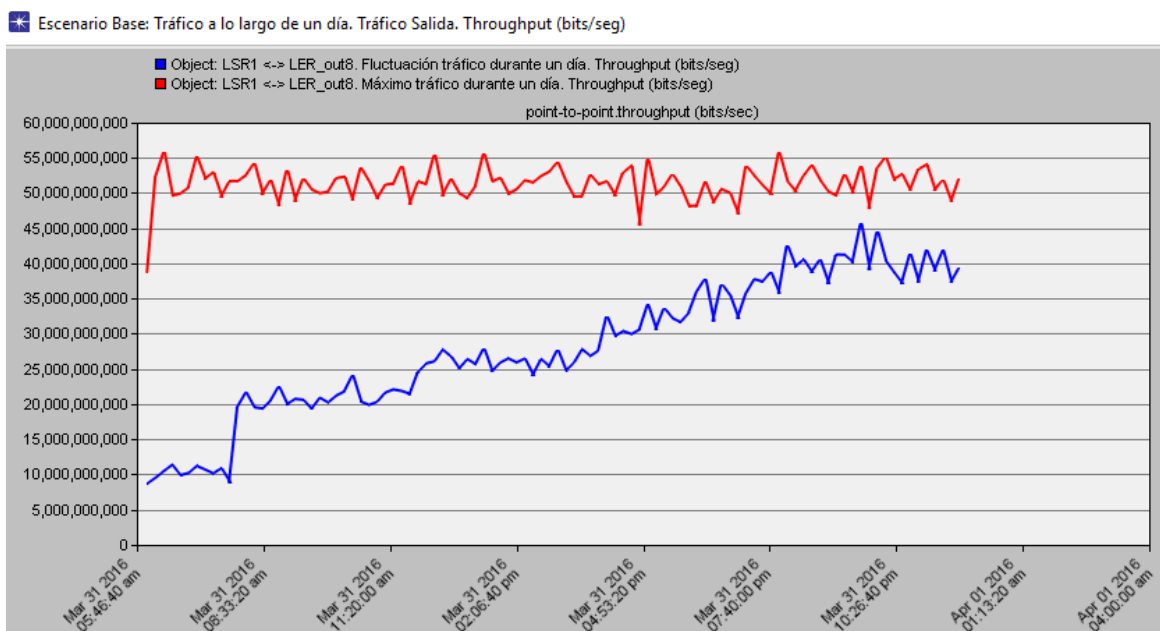


**Figura 4.44:** Escenario base: Comparación de la Utilización del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR1-LERout8

Analizando el *throughput* se observa que el máximo tráfico hacia la zona 4 sector 4\_1 es de 55 Gb (curva roja), en cambio en la curva azul se observa el tráfico a lo largo de un día con la red fluctuando entre 10 Gb a 45 Gb con un consumo promedio mayor en la noche y menor en el día.

El valor de *throughput* se mantiene menor a la capacidad total del enlace, por lo

que el retardo que se genere mantendrá una adecuada calidad de la señal.



**Figura 4.45:** Escenario base: Comparación del *Throughput* del enlace entre tráfico total vs tráfico a lo largo de un día en el enlace LSR1-LERouter8

#### 4.5.3 Comportamiento de la red base cuando existe fallo de enlaces

Este escenario hace referencia al comportamiento de la red cuando uno de los enlaces de los LER de entrada falla. Los servidores de cada servicio *Triple Play* ingresan por un LER de entrada determinado.

El servicio de Internet ingresa por el LER de entrada uno LER\_in1, el servicio de voz ingresa por el LER\_in2 y el servicio de televisión ingresa por el LER\_in3, cada *router* se conecta con los *router* LSR mediante dos enlaces, cada enlace representa el soporte del otro en caso de que exista un fallo en uno de los dos.

Se analiza el comportamiento de la red cuando un enlace de cada servicio sufre fallos, de tal forma que se compruebe la redundancia en las etiquetas LSP asignadas para cada servicio *Triple Play*.

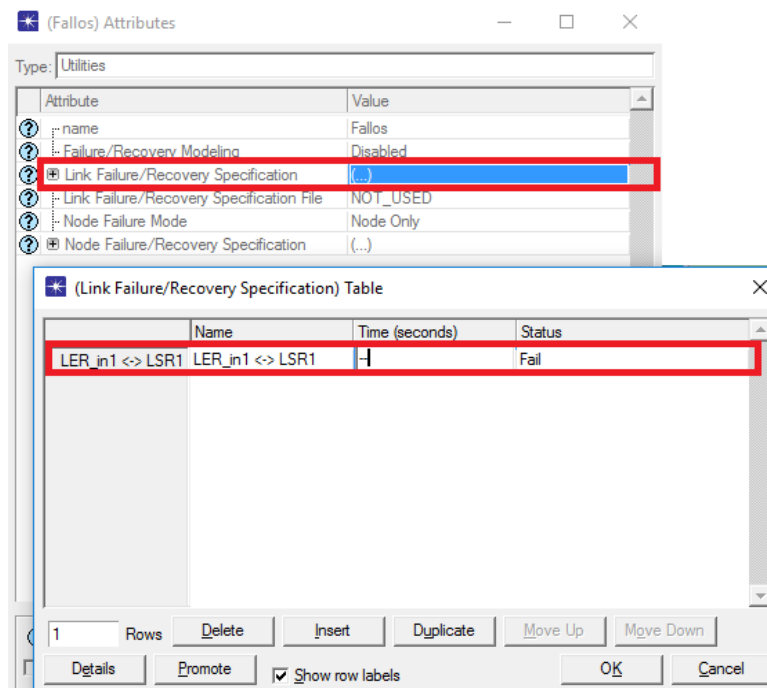
Para este escenario se analiza el tráfico de entrada en el LER\_in y el de salida en el LER\_out, se ha tomado como referencia la salida de un LER cualquiera de los ocho que componen la red núcleo, de tal forma que se generaliza el comportamiento

para los demás LER.

Además, el tráfico está etiquetado es decir las gráficas muestran el tráfico a lo largo de la capa núcleo antes de salir a la capa de distribución en donde el tráfico es por paquetes IP (sin las etiquetas MPLS).

El escenario se realiza con el tráfico calculado para el año 2020, con el 100% de la carga en la red, es decir se analiza el escenario para el 100 % de suscriptores conectados, cálculos que se obtuvieron en el Capítulo 3 en la sección de diseño de la red.

En OPNET existe una herramienta que permite analizar los fallos en la red, está se explicó en la sección de Equipos utilizados (4.1.3), en la misma se configura el enlace que va a fallar y posterior se ejecuta la red y se analizan los resultados.



**Figura 4.46:** Configuración falla de enlaces de entrada para cada servicio de *Triple Play* en el escenario base

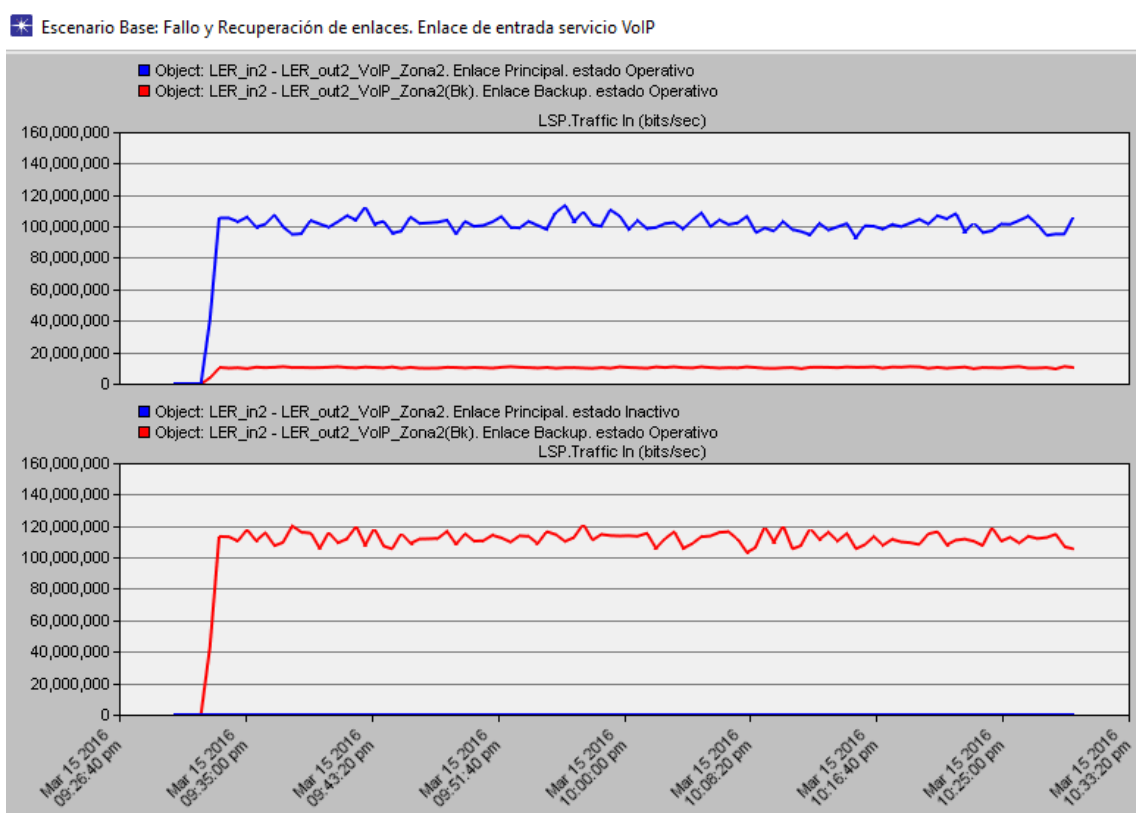
Para el servicio de VoIP se analiza el tráfico que llega a la Zona 2 (LER 2), para el servicio de IPTV se analiza el tráfico que llega a la Zona 1 (LER 1) y para el servicio de Internet se analiza el tráfico que llega a la Zona 3 (LER 3).

En la siguiente Figura se analiza el fallo del enlace para el servicio de voz, en el panel superior se muestra el tráfico de entrada hacia la LSP que corresponde a la ruta

LER\_in2 LER\_out2, la misma que comienza desde el LER de entrada dos y se dirige al LER de salida dos.

En azul se muestra el tráfico que cursa por la ruta principal (representa 90%) que corresponde a 100 Mbps y en rojo se muestra el tráfico que cursa por la ruta de *backup* (representa 10 %) que corresponde a 10 Mbps. La suma de las dos rutas corresponde al tráfico total que se dirige hacia la zona del LER 2 110 Mbps.

En el panel inferior se observa que la ruta principal presenta fallos, no ingresa tráfico por esta ruta, el tráfico en color azul es cero. En cambio, el tráfico en la línea roja es de 110 Mbps que es el total que circula hacia la Zona 2 (LER 2), la ruta por la que ingresa este tráfico es la de *backup*, por lo tanto, se muestra que al presentar un fallo el enlace de tráfico de voz la ruta de *backup* se vuelve principal y todo el tráfico circula por esta, impidiendo así que se pierda información.

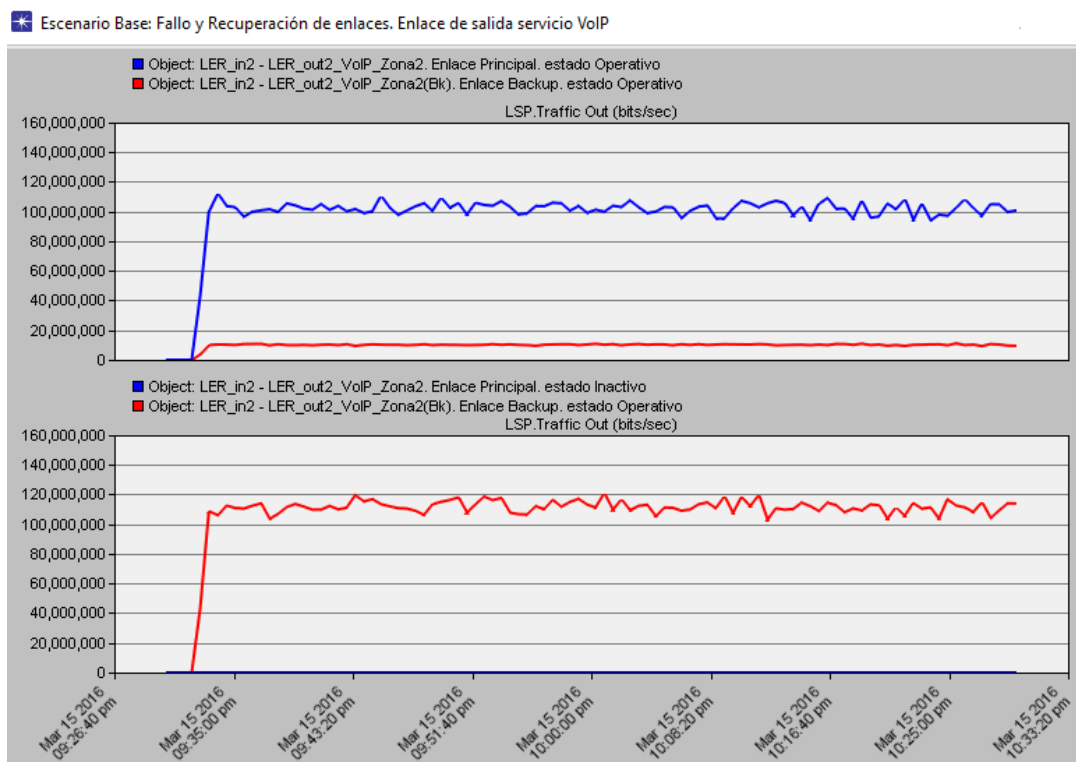


**Figura 4.47:** Escenario base: Comparación del *Throughput* de entrada cuando existe falla en el enlace de entrada LER\_in2 correspondiente al servicio VoIP

En la siguiente gráfica se observa el tráfico de salida, es decir el tráfico que cursa por el LER\_out2. En el panel superior se muestra el tráfico que sale de la LSP, en color azul se representa a la ruta principal y en color rojo a la ruta de *backup*, el total de ambas es de 110 Mbps, el tráfico de llegada es el mismo que entró en el LER\_in como

se observó en la Figura anterior.

En el panel inferior se muestra el enlace cuando la ruta principal ha sufrido fallo, en este caso todo el tráfico de llegada lo realiza la ruta de *backup*, en color rojo se muestra que el tráfico de salida es de 110 Mbps. Por lo tanto, la configuración de la red MPLS ha permitido recuperar la información transmitida mediante las LSP de *backup*, por lo que mantiene su operatividad gracias a los enlaces de redundancia.



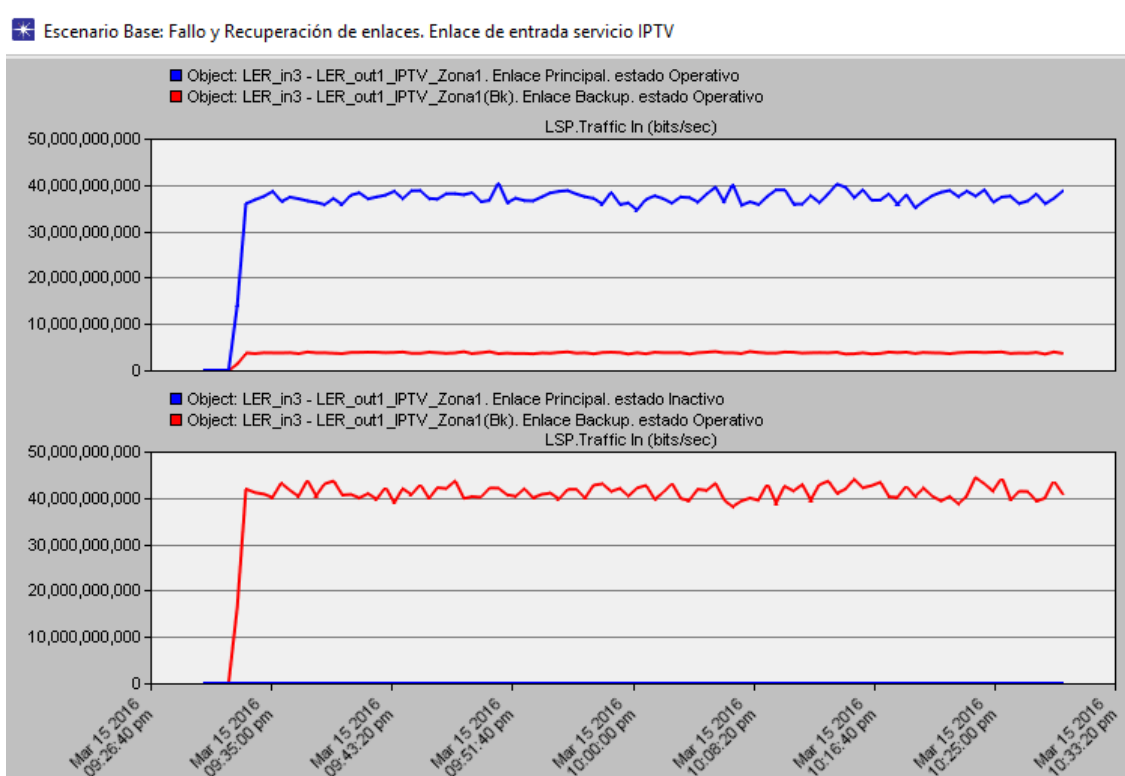
**Figura 4.48:** Escenario base: Comparación del *Throughput* de salida cuando existe falla en el enlace de entrada LER\_in2 correspondiente al servicio VoIP

En el caso del servicio IPTV se analiza la ruta LER\_in3-LER\_out1, la misma ingresa a la red MPLS por el LER 3 con el servicio de televisión y sale por el LER 1 que distribuye el tráfico por la zona 1. La siguiente gráfica toma como referencia la Zona 1, como se indicó cada parte está balanceada con una cantidad de tráfico similar por lo que el comportamiento de cada zona debe ser parecido.

En el panel superior de la gráfica se muestra en azul el tráfico que ingresa por la LSP en la ruta principal, el valor representa el 90 % del tráfico total de televisión que se distribuye a la Zona 1 (40 Gb aprox), además en rojo se representa la LSP de *backup* que distribuye el 10 % del total del tráfico (4 Gb aprox).

En el panel inferior se detalla el mismo escenario cuando falla el enlace de televisión por la cual circula la LSP principal, en azul se muestra que el tráfico que ingresa es cero.

En cambio, en rojo se observa que el tráfico que circula por la LSP *backup* es de 44 Gb aprox, por lo cual la LSP de respaldo asume todo el tráfico asignado a la Zona 1 para el servicio de IPTV, se concluye que al existir falla en el enlace de entrada de televisión la redundancia que existe en la red permite recuperar la información a ser transmitida.

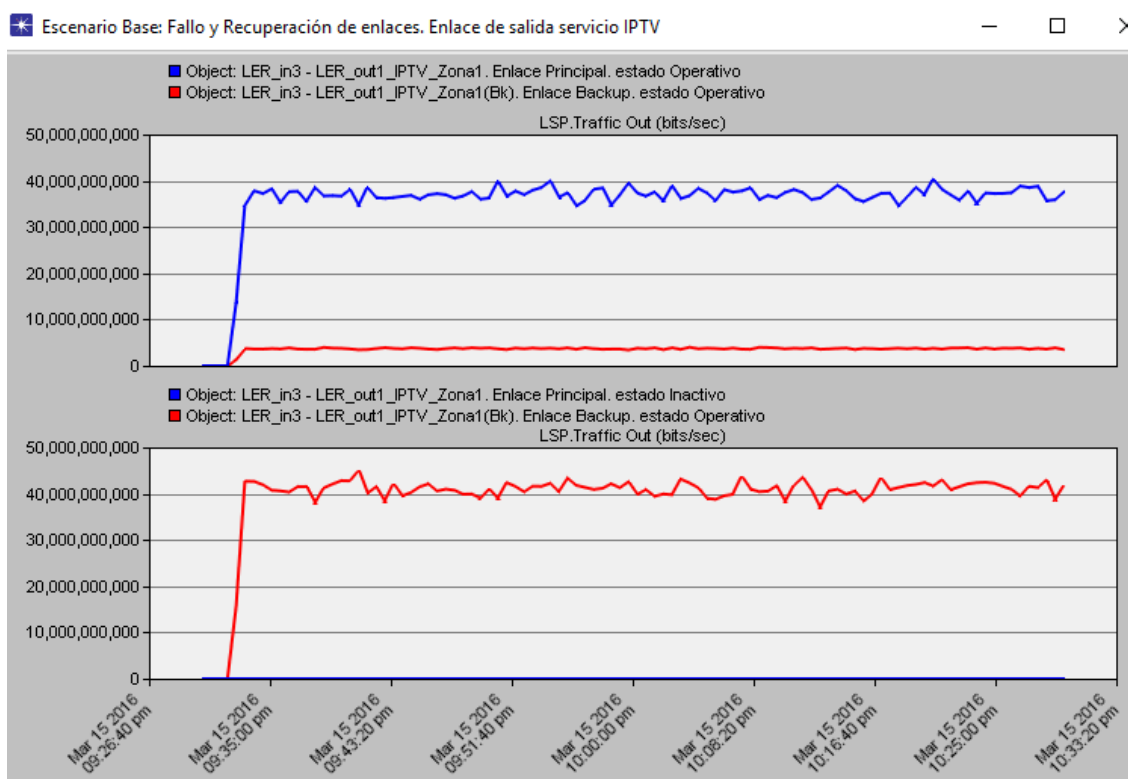


**Figura 4.49:** Escenario base: Comparación del *Throughput* de entrada cuando existe falla en el enlace de entrada LER\_in3 correspondiente al servicio IPTV

En la siguiente Figura se muestra el tráfico que sale por la LSP, en el escenario sin fallas (panel superior) el comportamiento es similar al tráfico de entrada, es decir 90% (40 Gb) del tráfico sale por la ruta principal y 10% (4 Gb) de tráfico sale por la LSP *backup*.

En el panel inferior se observa que cuando se presenta un fallo en el enlace de entrada el tráfico que sale por la LSP principal es cero representado por la línea en azul en cambio por la LSP de *backup* sale el total de tráfico es decir 44 Gb aprox. Se demuestra que en el tráfico no se pierde si un enlace falla, la ruta de *backup* recupera

toda la información que es transmitida.

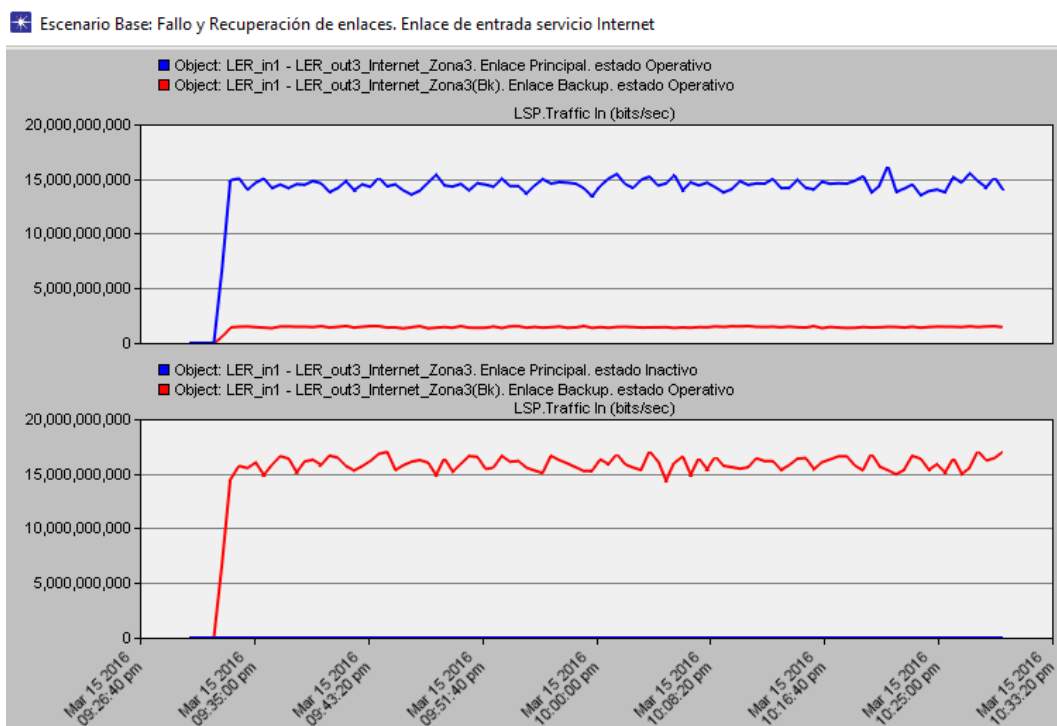


**Figura 4.50:** Escenario base: Comparación del *Throughput* de salida cuando existe falla en el enlace de entrada LER\_in3 correspondiente al servicio IPTV

En el caso del servicio de Internet se analiza la ruta LER\_in1-LER\_out3, la misma ingresa a la red MPLS por el LER 1 con el servicio de Internet y sale por el LER 3 que distribuye el tráfico por la zona 3.

En el panel superior de la gráfica se muestra en azul el tráfico que ingresa por la LSP en la ruta principal, el valor representa el 90 % del tráfico total de Internet que se distribuye a la Zona 3 (14 Gb aprox), además en rojo se representa la LSP de *backup* que distribuye el 10 % del total del tráfico (1,4 Gb aprox). En el panel inferior se detalla el mismo escenario cuando falla el enlace de Internet por la cual circula la LSP principal, en azul se muestra que el tráfico que ingresa es cero.

En cambio, en rojo se observa que el tráfico que circula por la LSP *backup* es de 14 Gb aprox, por lo cual la LSP de respaldo asume todo el tráfico asignado a la Zona 3 para el servicio de Internet, se concluye que al existir falla en el enlace de entrada de Internet la redundancia que existe en la red permite recuperar la información a ser transmitida.



**Figura 4.51:** Escenario base: Comparación del *Throughput* de entrada cuando existe falla en el enlace de entrada LER\_in1 correspondiente al servicio Internet

En la Figura 4.52 se muestra el tráfico que sale por la LSP, en el escenario sin fallas (panel superior) el comportamiento es similar al tráfico de entrada, es decir 90% (14 Gb) del tráfico sale por la ruta principal y 10% (1,4 Gb) de tráfico sale por la LSP *backup*.

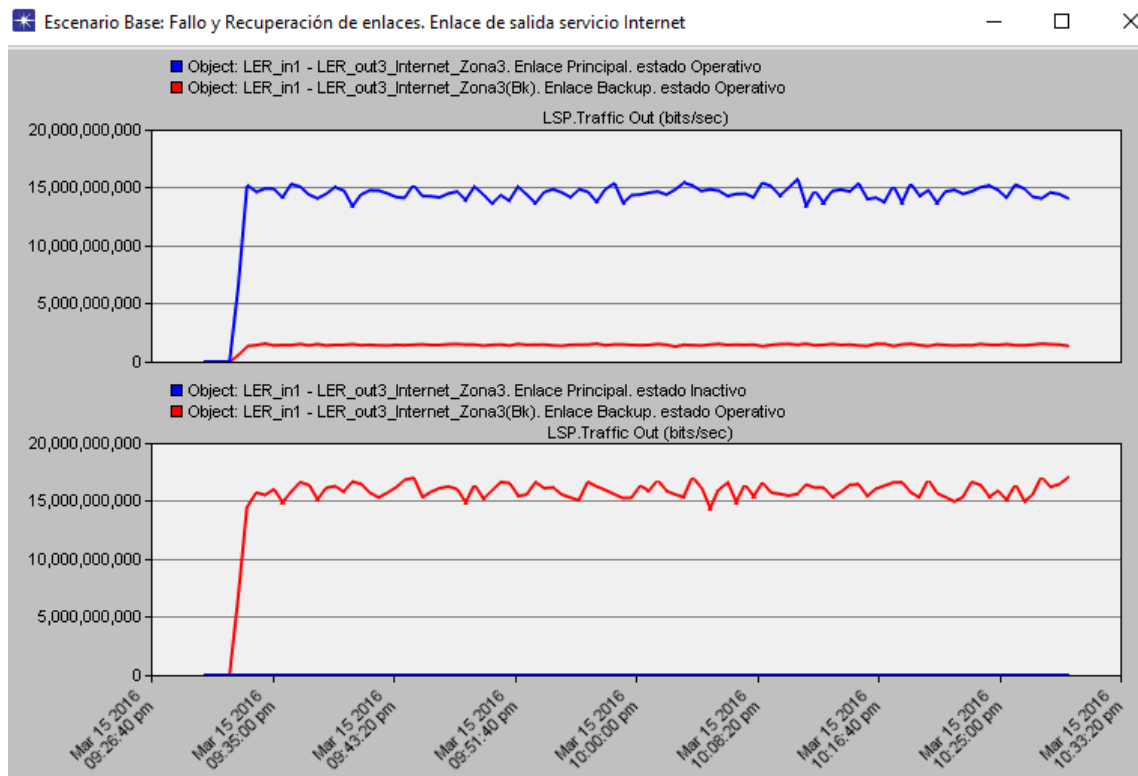
En el panel inferior se observa que cuando se presenta un fallo en el enlace de entrada el tráfico que sale por la LSP principal es cero representado por la curva en azul, en cambio por la LSP de *backup* sale el total de tráfico es decir 14 Gb aprox. Se demuestra que en el tráfico no se pierde si un enlace de Internet falla, la ruta de *backup* recupera toda la información que es transmitida.

#### 4.5.4 Comportamiento de la red base cuando existe fallo en un LSR

Ante la eminente posibilidad de perder un *router* LSR, ya sea por un fallo inesperado en el hardware del equipo o por un error en el *software* del mismo, se analiza las consecuencias que la inactividad de uno de los cuatro LSRs tendría en la red.

El análisis se realiza considerando que por la red está fluyendo el 100% del tráfico posible, previamente diseñado en el Capítulo 3 (Revisar 4.5.1).





**Figura 4.52:** Escenario base: Comparación del *Throughput* de salida cuando existe falla en el enlace de entrada LER\_in1 correspondiente al servicio Internet

A continuación, se exhiben cuatro gráficas, una por cada LSR inactivo. En cada una de las gráficas se observa el *throughput* del tráfico de salida en uno de los cinco *routers* de distribución pertenecientes a cada uno de los ocho LERs de salida. (Figura 4.13). De los ocho LERs, cinco corresponden a Cuenca y su tráfico ha sido equitativamente distribuido entre ellos, por ese motivo se observa cuatro curvas en lugar de ocho, una sola curva representa a las cinco de Cuenca, ya que el tráfico es el mismo.

### Primera gráfica:

#### **Router inactivo: LSR1**

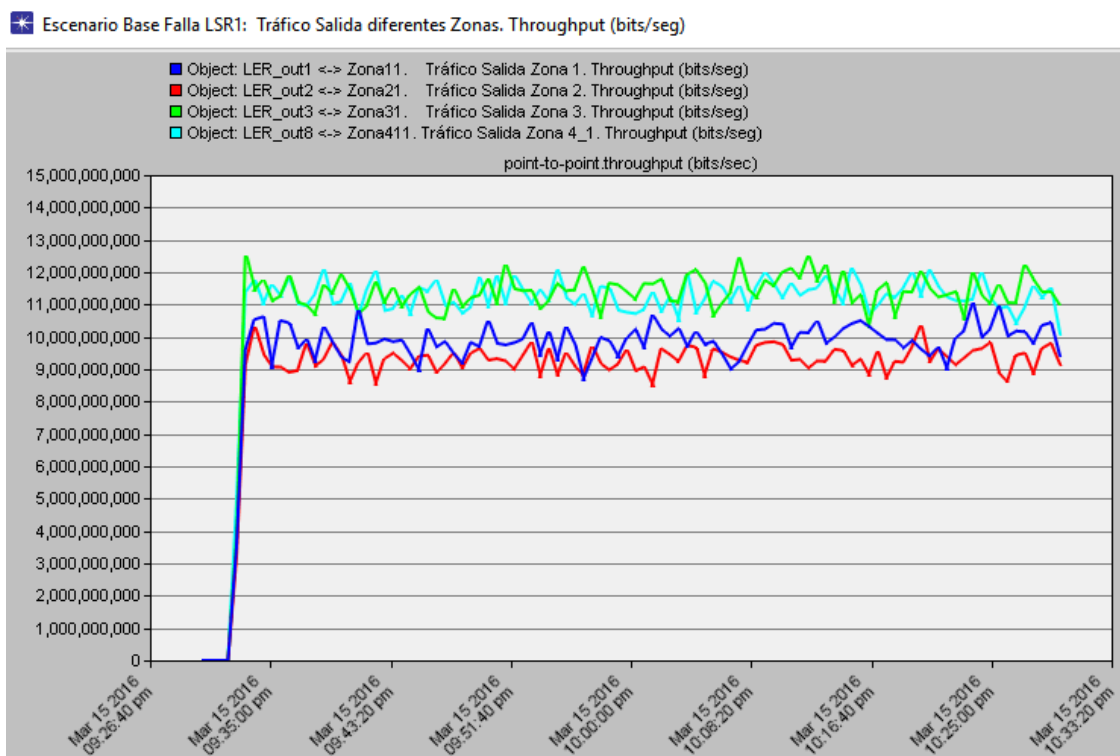
Se simula la caída del *router* LSR1, al perder este nodo se pierden también los siguientes enlaces:

LSR1-LERout8, LERin1-LSR1, LERin2-LSR1, LSR1-LSR2, LSR1-LSR3, LSR1-LERout7, LSR1-LERout4, LSR1-LERout1.

La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados

en la Tabla 4.3

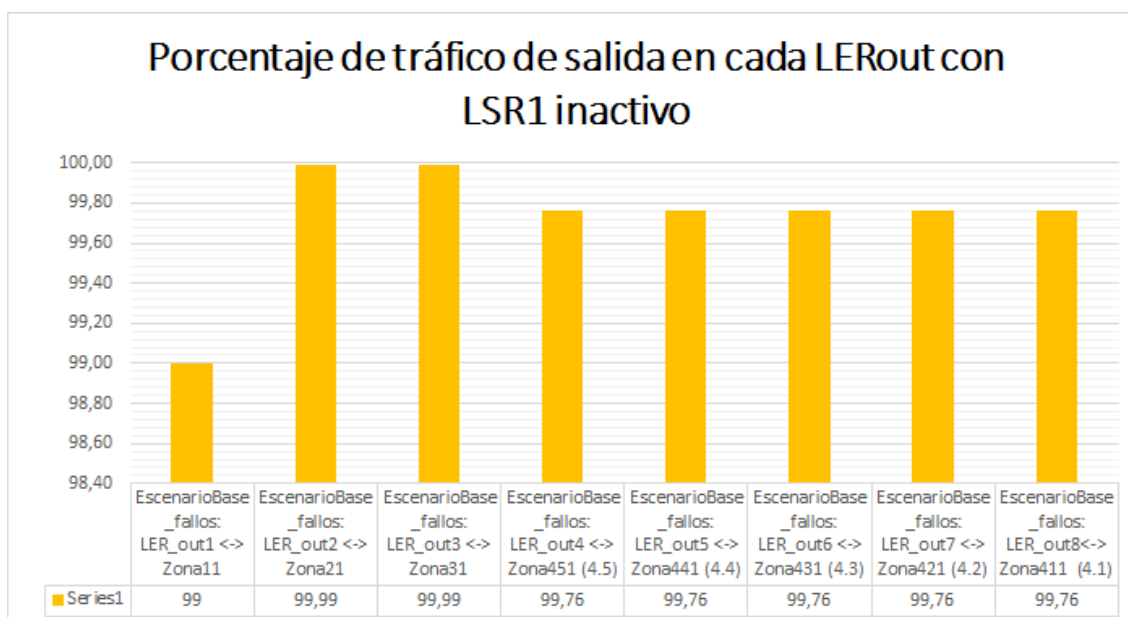
En la siguiente gráfica se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de cada uno de los LER\_out de la Zona 1, Zona 2, Zona 3 y Zona 4 cuando LSR1 se encuentra en estado inactivo.



**Figura 4.53:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de cada uno de los LER\_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR1 se encuentra en estado inactivo

Una vez inactivo el *router* LSR1 y perdidos los enlaces antes mencionados con sus respectivos LSPs, los LSPs de *backup* recuperan todo el tráfico de la red, evitando pérdidas y permitiendo a la información llegar a su destino.

En la Figura 4.54 se observa el porcentaje de tráfico que llega a su destino, con respecto al tráfico enviado. Se puede claramente observar que no ha habido pérdidas, existe una fluctuación del 1%, lo cual representa un comportamiento normal en la red.



**Figura 4.54:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR1 se encuentran en estado inactivo

### Segunda gráfica:

#### **Router inactivo: LSR2**

Se simula la caída del *router* LSR2, al perder este nodo se pierden también los siguientes enlaces:

LSR2-LERout2, LSR2-LERout3, LSR2-LERout4, LSR2-LERout5, LERin3-LSR2, LSR2-LSR1, LSR2-LSR3, LSR2-LSR4.

La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3

En la Figura 4.55 se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de cada uno de los LER\_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR2 se encuentra en estado inactivo.

Una vez inactivo el *router* LSR2 y perdidos los enlaces antes mencionados con sus respectivos LSPs, los LSPs de *backup* recuperan todo el tráfico de la red, evitando pérdidas y permitiendo a la información llegar a su destino.

En la Figura 4.56 se observa el porcentaje de tráfico que llega a su destino, con respecto al tráfico enviado.



Se puede claramente observar que no ha habido pérdidas, existe una fluctuación del 1%, lo cual representa un comportamiento normal en la red.

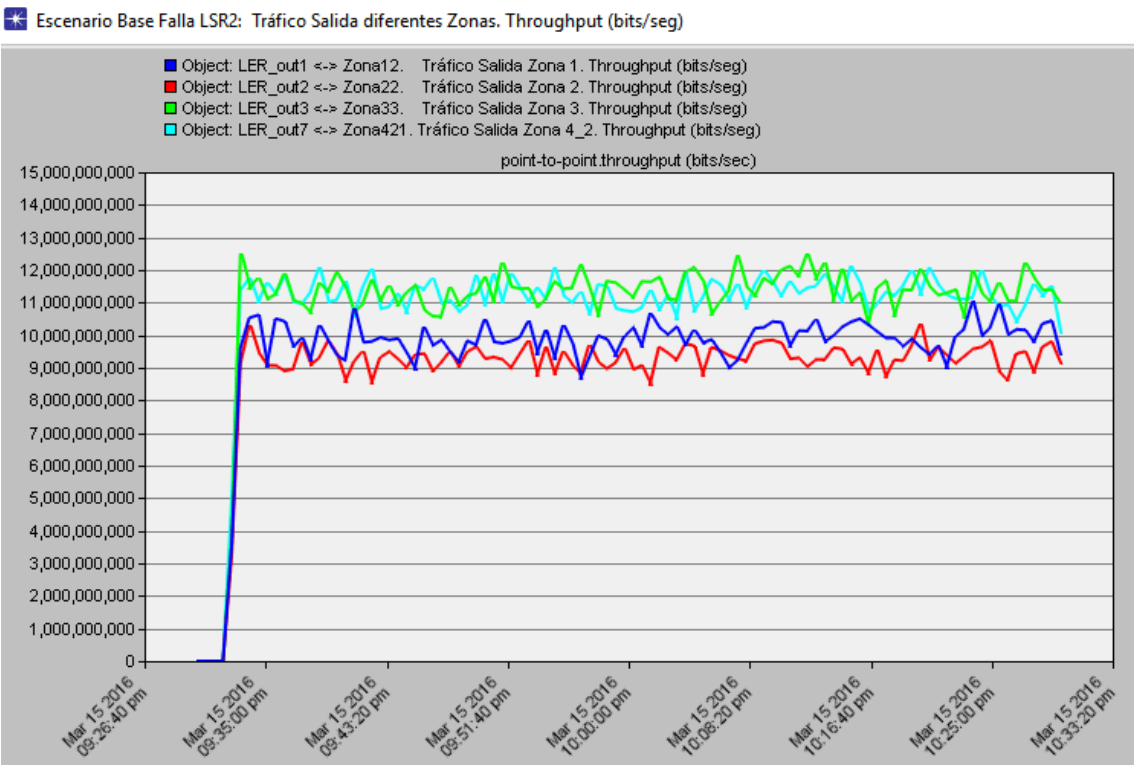


Figura 4.55: Throughput de salida en uno de los cinco routers de distribución de cada uno de los LER\_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR2 se encuentra en estado inactivo

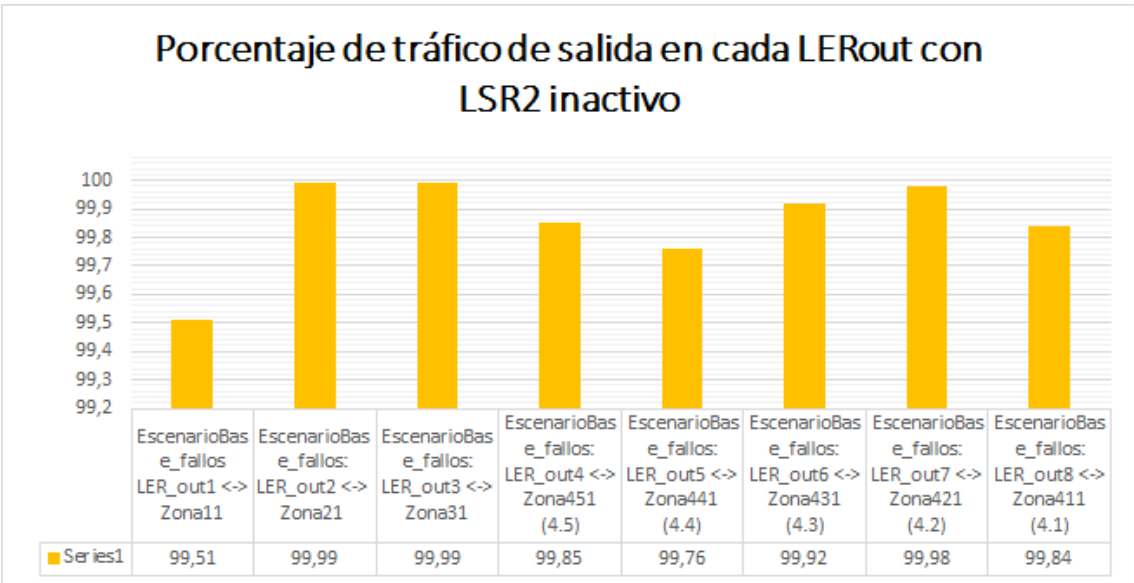


Figura 4.56: Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR2 se encuentran en estado inactivo

### Tercera gráfica:

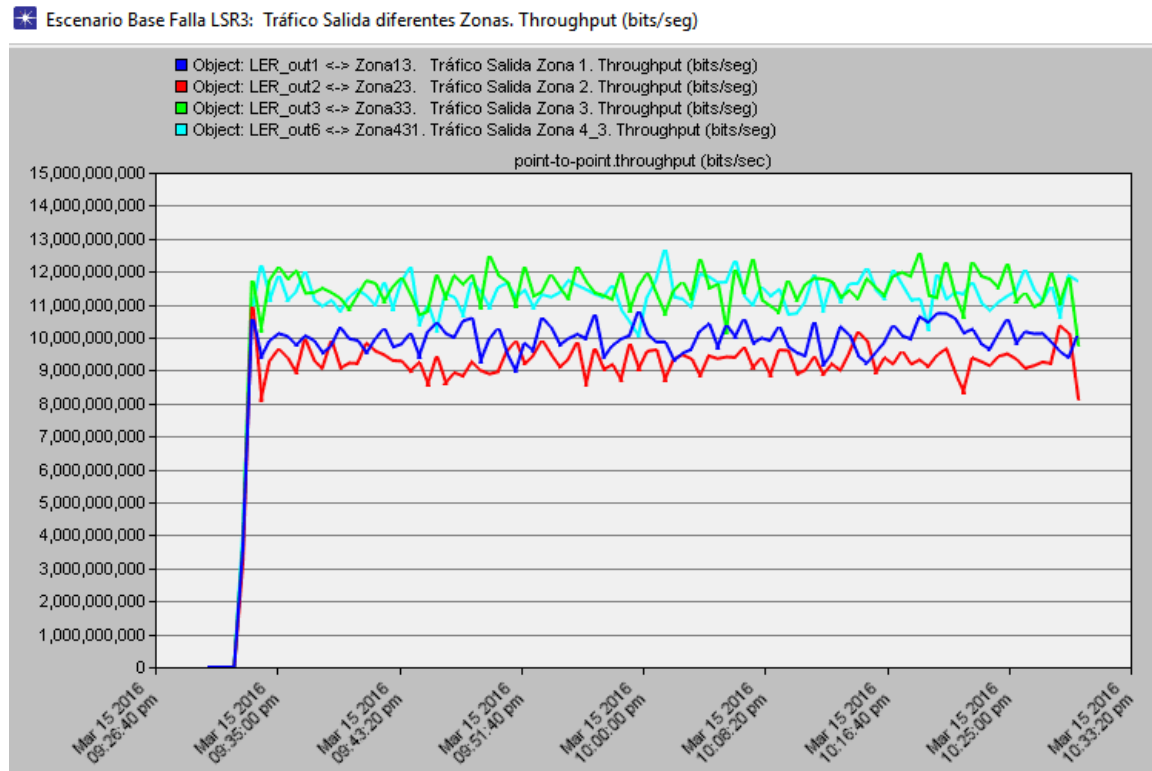
#### Router inactivo: LSR3

Se simula la caída del *router* LSR3, al perder este nodo se pierden también los siguientes enlaces:

LSR3-LERout8, LSR3-LERout6, LSR3-LERout5, LSR3-LERout3, LERin3-LSR3, LSR1-LSR3, LSR2-LSR3, LSR3-LSR4.

La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3

En la siguiente gráfica se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de cada uno de los LER\_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR3 se encuentra en estado inactivo.

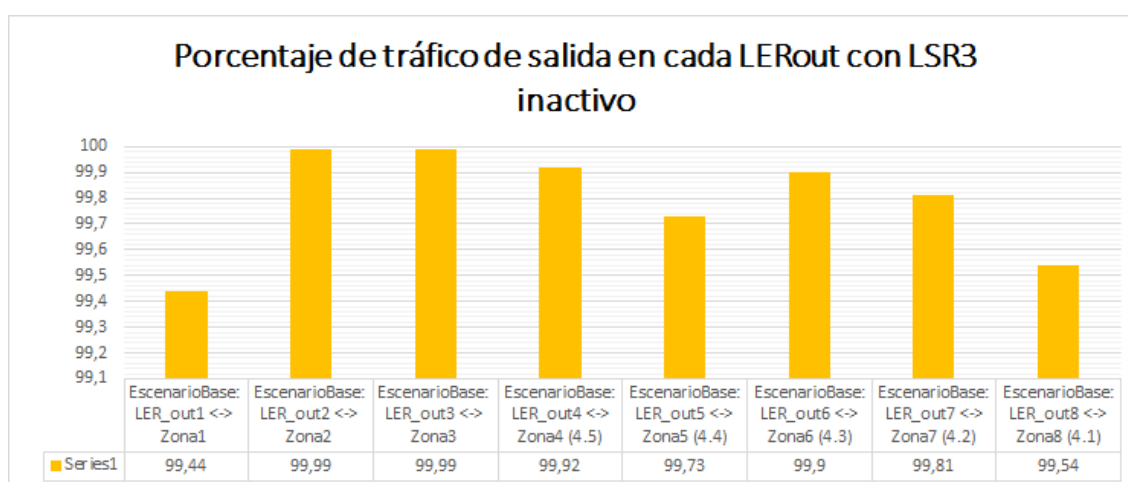


**Figura 4.57:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de cada uno de los LER\_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR3 se encuentra en estado inactivo

Una vez inactivo el *router* LSR3 y perdidos los enlaces antes mencionados con sus respectivos LSPs, los LSPs de *backup* recuperan todo el tráfico de la red, evitando pérdidas y permitiendo a la información llegar a su destino.

En la siguiente gráfica se observa el porcentaje de tráfico que llega a su destino, con respecto al tráfico enviado.

Se puede claramente observar que no ha habido pérdidas, existe una fluctuación del 1%, lo cual representa un comportamiento normal en la red.



**Figura 4.58:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR3 se encuentran en estado inactivo

#### Cuarta gráfica:

##### **Router inactivo: LSR4**

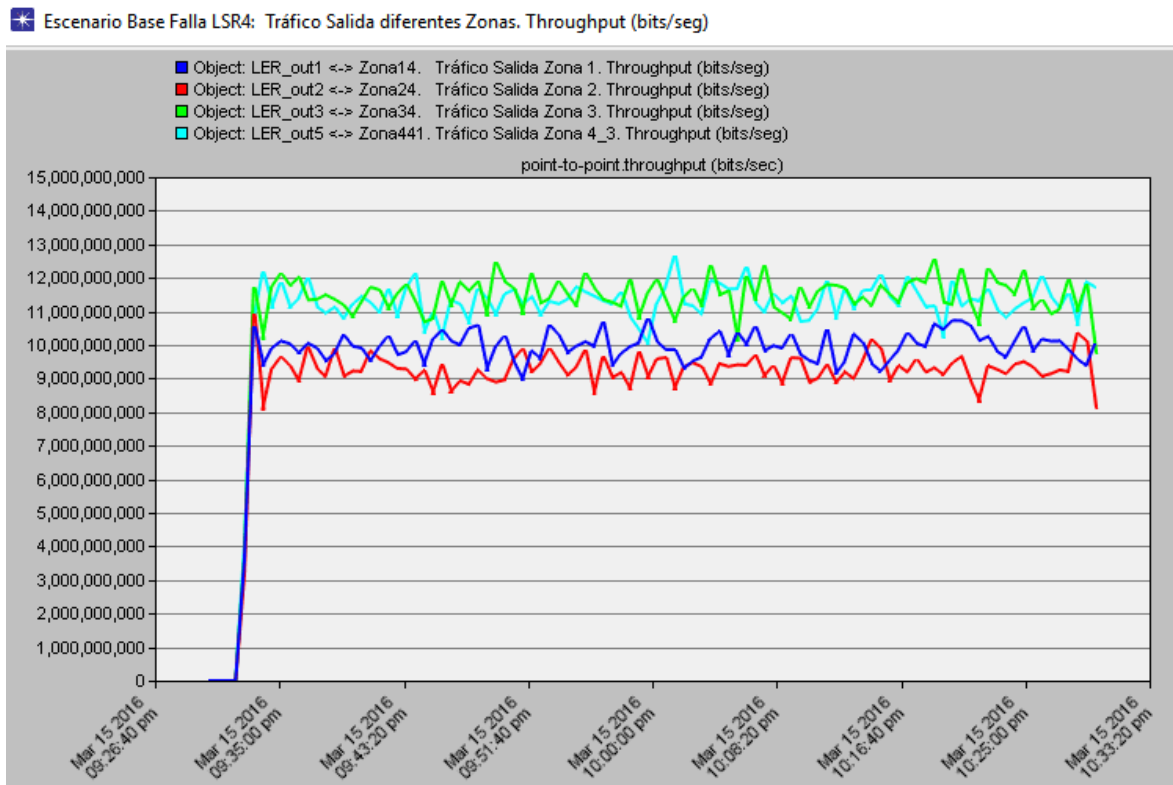
Se simula la caída del *router* LSR3, al perder este nodo se pierden también los siguientes enlaces:

LSR4-LERout1, LSR4-LERout2, LSR4-LERout7, LSR4-LERout6, LERin1-LSR4, LERin2-LSR4, LSR2-LSR4, LSR3-LSR34.

La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3

En la siguiente gráfica se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de cada uno de los LER\_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona

4 cuando LSR4 se encuentra en estado inactivo.

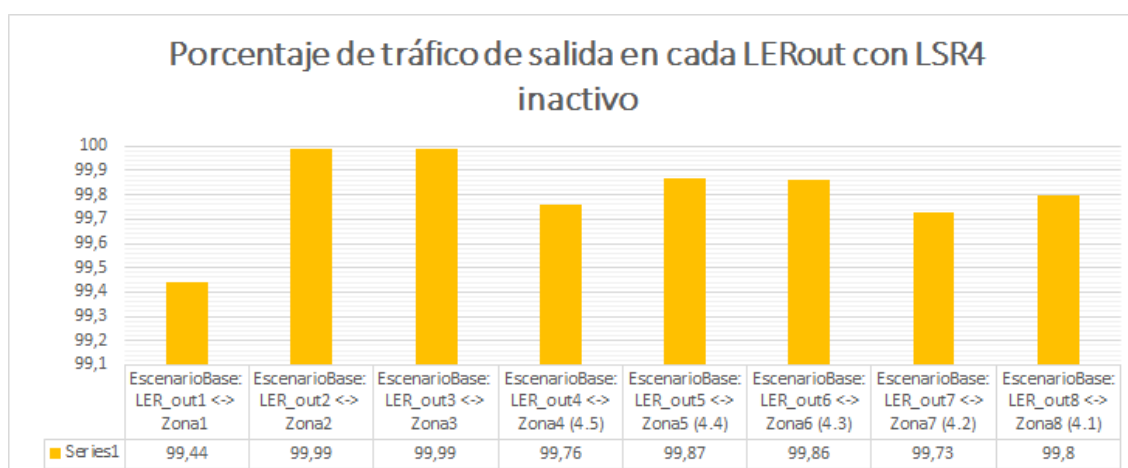


**Figura 4.59:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de cada uno de los LER\_out de la zona 1, zona 2, zona 3 y zona 4 cuando LSR4 se encuentra en estado inactivo

Una vez inactivo el *router* LSR4 y perdidos los enlaces antes mencionados con sus respectivos LSPs, los LSPs de *backup* recuperan todo el tráfico de la red, evitando pérdidas y permitiendo a la información llegar a su destino.

En la siguiente gráfica se observa el porcentaje de tráfico que llega a su destino, con respecto al tráfico enviado.

Se puede claramente observar que no ha habido pérdidas, existe una fluctuación del 1%, lo cual representa un comportamiento normal en la red.



**Figura 4.60:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR4 se encuentran en estado inactivo

#### 4.5.5 Comportamiento de la red base cuando existe fallo en dos LSRs

La falla en un equipo LSR es un evento de alerta, durante el cual, el personal técnico debe trabajar para recuperar el fallo y conseguir que todos los nodos de la red y los enlaces implicados vuelvan a estado operativo. Sin embargo, podría darse el caso que, tras la pérdida de un LSR, exista la pérdida de un segundo equipo, aunque este caso ya no sería un evento normal sino más bien una consecuencia de la falta de mantenimiento de la red.

En las gráficas que se presentan más adelante se pretende analizar las consecuencias que la pérdida de dos *routers* LSR tendría en la red. Las curvas expuestas en cada una de las gráficas, pertenecen al *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución conectados a cada uno de los ocho LERs de salida.

Para evitar tener demasiadas curvas en una sola imagen, cada evento se ha dividido en dos gráficas, en donde la primera muestra los resultados de los tres primeros LERs de salida y la segunda los cinco últimos, pertenecientes a la ciudad de Cuenca.

##### Primera gráfica:

##### **Routers inactivos: LSR1 y LSR2**

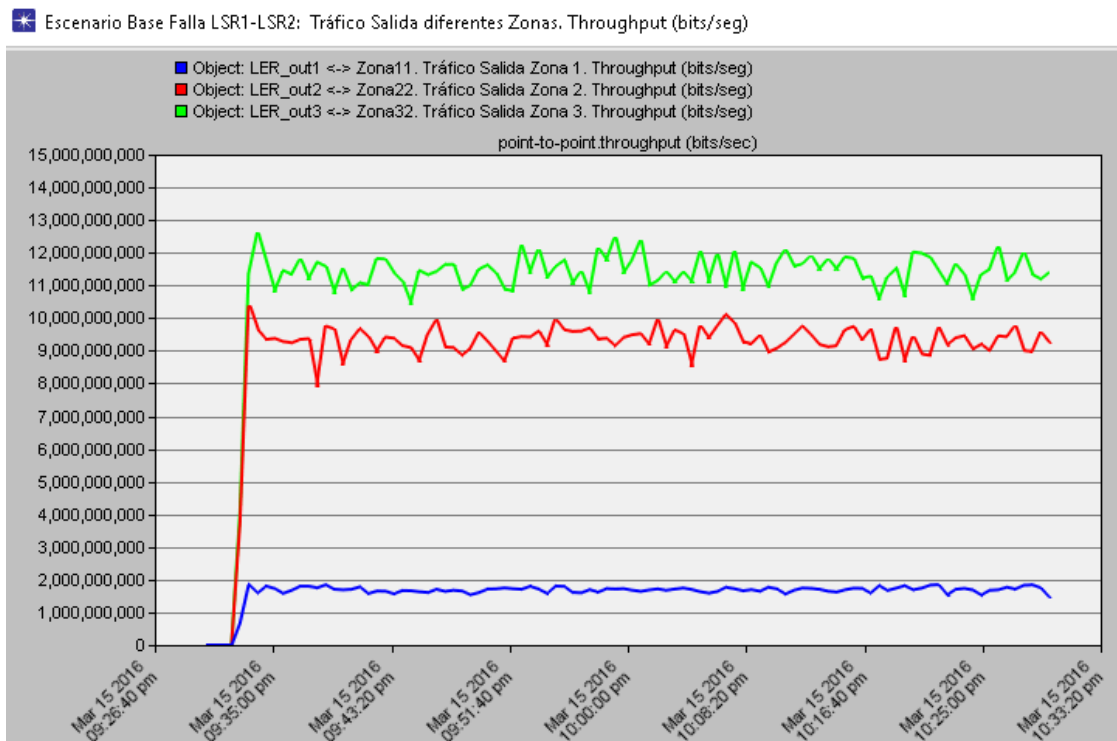
Se simula la caída de los *routers* LSR1 y LSR2, al perder estos nodos se pierden también los siguientes enlaces:



LSR1-LERout8, LERin1-LSR1, LERin2-LSR1, LSR1-LSR2, LSR1-LSR3, LSR1-LERout7, LSR1-LERout4, LSR1-LERout1, LSR2-LERout2, LSR2-LERout3, LSR2-LERout4, LSR2-LERout5, LERin3-LSR2, LSR2-LSR3, LSR2-LSR4.

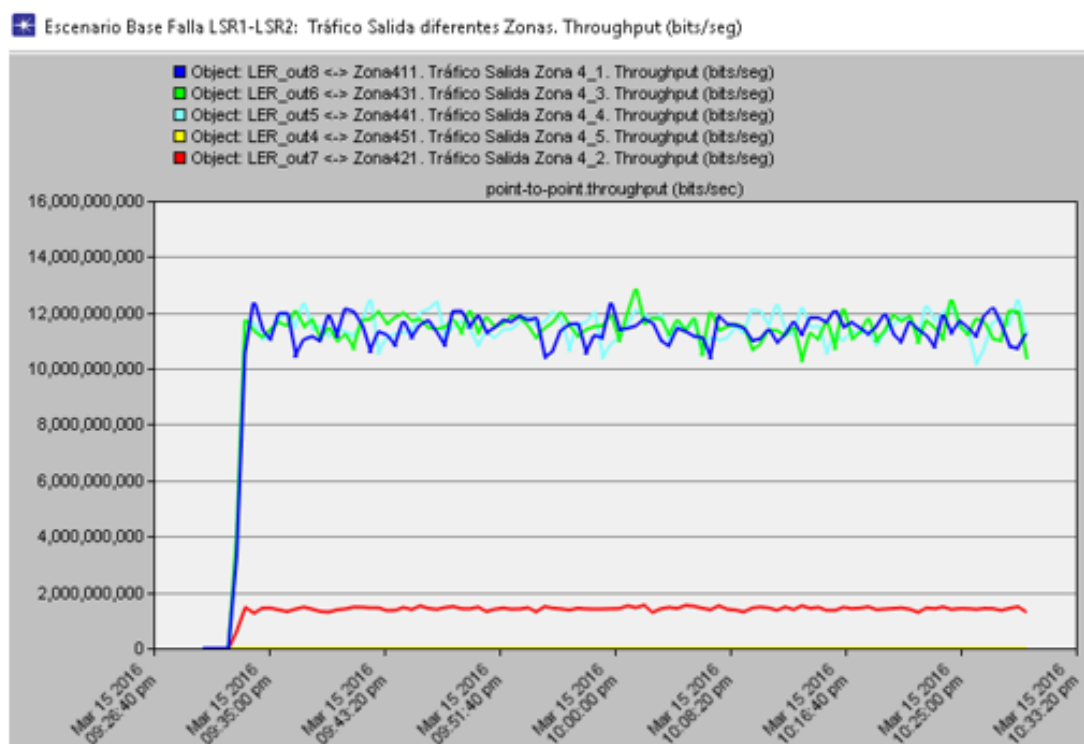
La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3

En la siguiente gráfica se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1 y LSR2 se encuentran en estado inactivo.



**Figura 4.61:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1 y LSR2 se encuentran en estado inactivo

En la Figura 4.62 se muestra el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1 y LSR2 se encuentran en estado inactivo.



**Figura 4.62:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1 y LSR2 se encuentran en estado inactivo

El haber perdido el LSR1 y LSR2 ha provocado la pérdida de una gran cantidad de enlaces y, por consiguiente, LSPs, comprometiendo las rutas de tráfico tanto principal como *backup* del LER de salida número cuatro, perteneciente a la zona 4.

En el gráfico de barras (Figura 4.63) se observa que con el fallo de los LSRs 1 y 2, el tráfico del LERout4 se ha visto completamente comprometido, perdiendo el 100% de su información.

### Segunda gráfica:

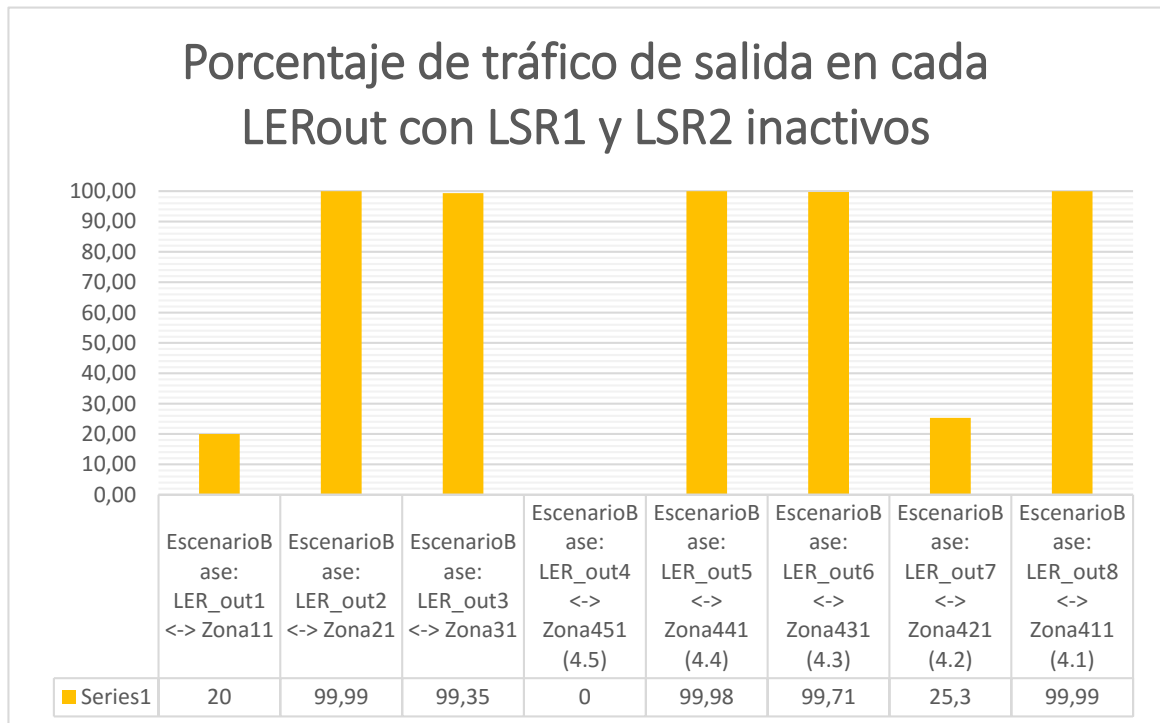
#### **Routers inactivos: LSR1 y LSR3**

Se simula la caída de los *routers* LSR1 y LSR3, al perder estos nodos se pierden también los siguientes enlaces:

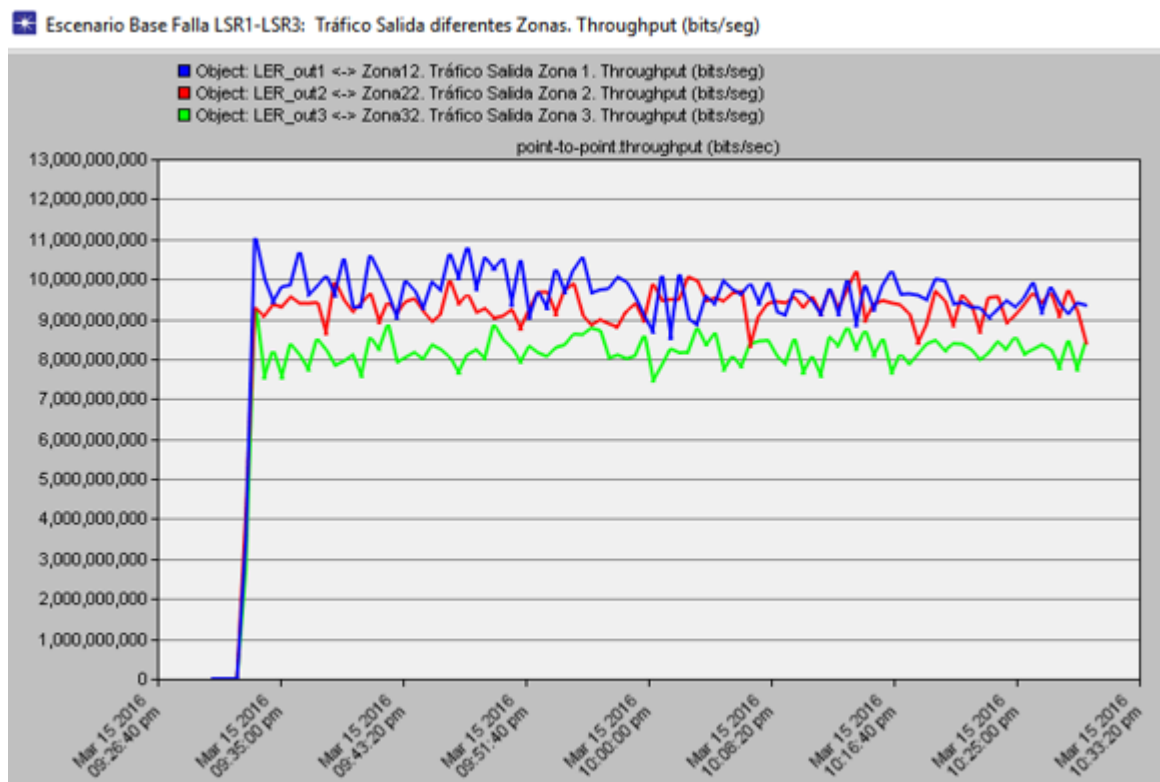
LSR1-LERout8, LERin1-LSR1, LERin2-LSR1, LSR1-LSR2, LSR1-LSR3, LSR1-LERout7, LSR1-LERout4, LSR1-LERout1, LSR3-LERout8, LSR3-LERout6, LSR3-LERout5, LSR3-LERout3, LERin3-LSR3, LSR1-LSR3, LSR2-LSR3, LSR3-LSR4. La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3.

En la Figura 4.64 se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers*

de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1 y LSR3 se encuentran en estado inactivo.



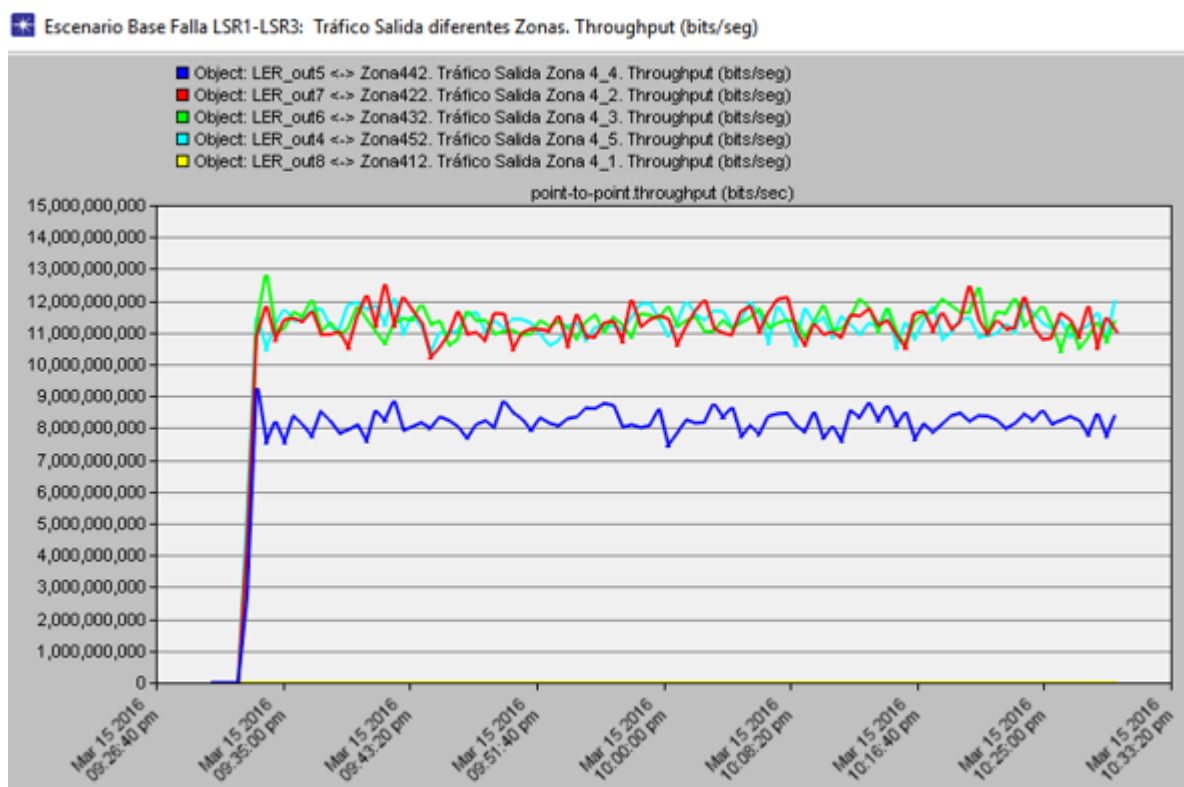
**Figura 4.63:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR1 y LSR2 se encuentran en estado inactivo



**Figura 4.64:** Throughput de salida en uno de los cinco routers de distribución de los

LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1 y LSR3 se encuentran en estado inactivo

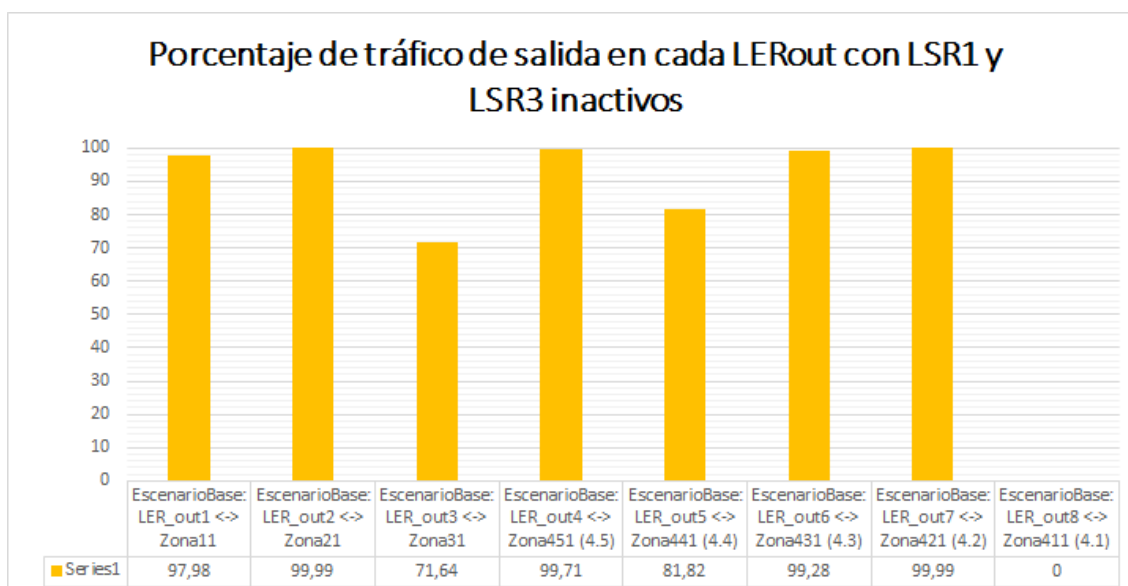
En la gráfica a continuación se muestra el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1 y LSR3 se encuentran en estado inactivo.



**Figura 4.65:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1 y LSR3 se encuentran en estado inactivo

El haber perdido el LSR1 y LSR3 ha provocado la pérdida de una gran cantidad de enlaces y, por consiguiente, LSPs, comprometiendo las rutas de tráfico de los servicios de Internet, voz y televisión, tanto principal como de *backup* del LER de salida número 8, perteneciente a la zona 4. Además, se han perdido las LSPs, principal y de *backup*, encargadas de transportar el tráfico de voz y de Internet hacia los *routers* LERout3, perteneciente a la zona 3 y LERout5, perteneciente a la zona 4.

En el siguiente gráfico de barras se observa que con el fallo de los LSRs 1 y 3, el tráfico del LERout8 se ha visto completamente comprometido, perdiendo el 100% de su información, mientras que, LERout3 y LERout5 han perdido aproximadamente el 30% y 20% de su tráfico total, respectivamente, los cuales pertenece a los servicios de voz e Internet.



**Figura 4.66:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR1 y LSR3 se encuentran en estado inactivo

Tercera gráfica:

#### **Routers inactivos: LSR2 y LSR4**

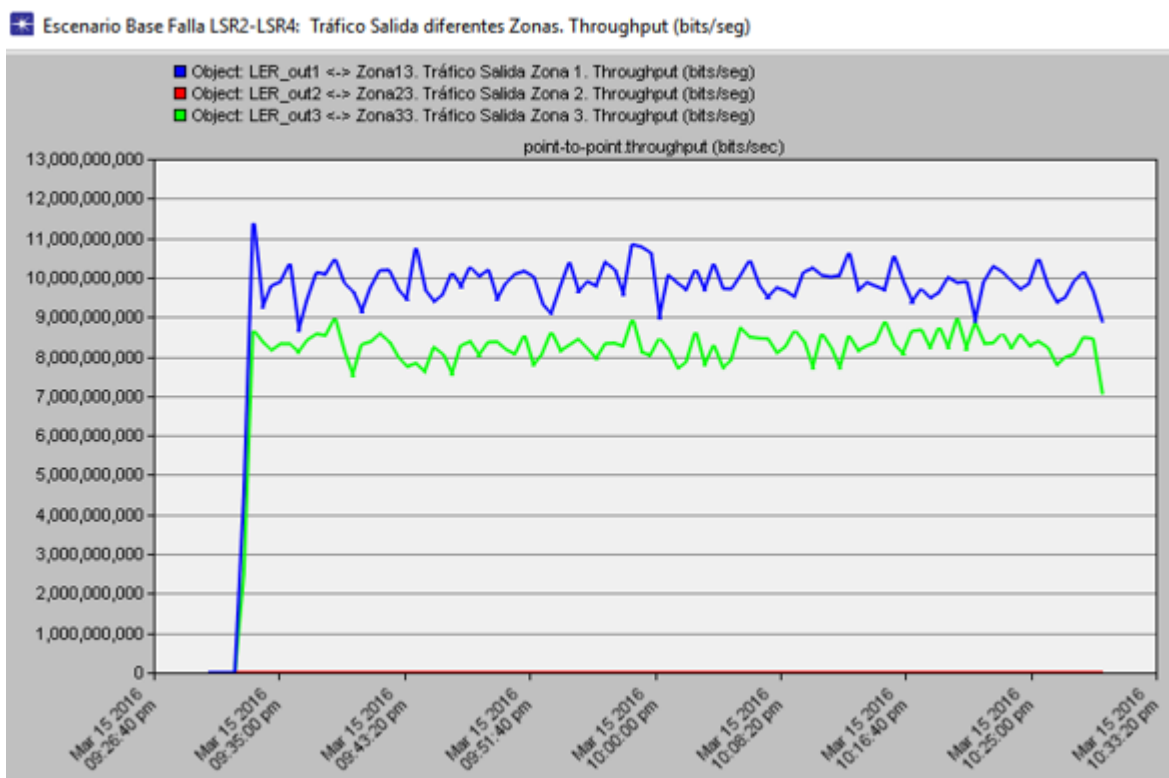
Se simula la caída de los *routers* LSR2 y LSR4, al perder estos nodos se pierden también los siguientes enlaces:

LSR2-LERout2, LSR2-LERout3, LSR2-LERout4, LSR2-LERout5, LERin3-LSR2, LSR2-LSR1, LSR2-LSR3, LSR2-LSR4, LSR4-LERout1, LSR4-LERout2, LSR4-LERout7, LSR4-LERout6, LERin1-LSR4, LERin2-LSR4, LSR2-LSR4, LSR3-LSR4.

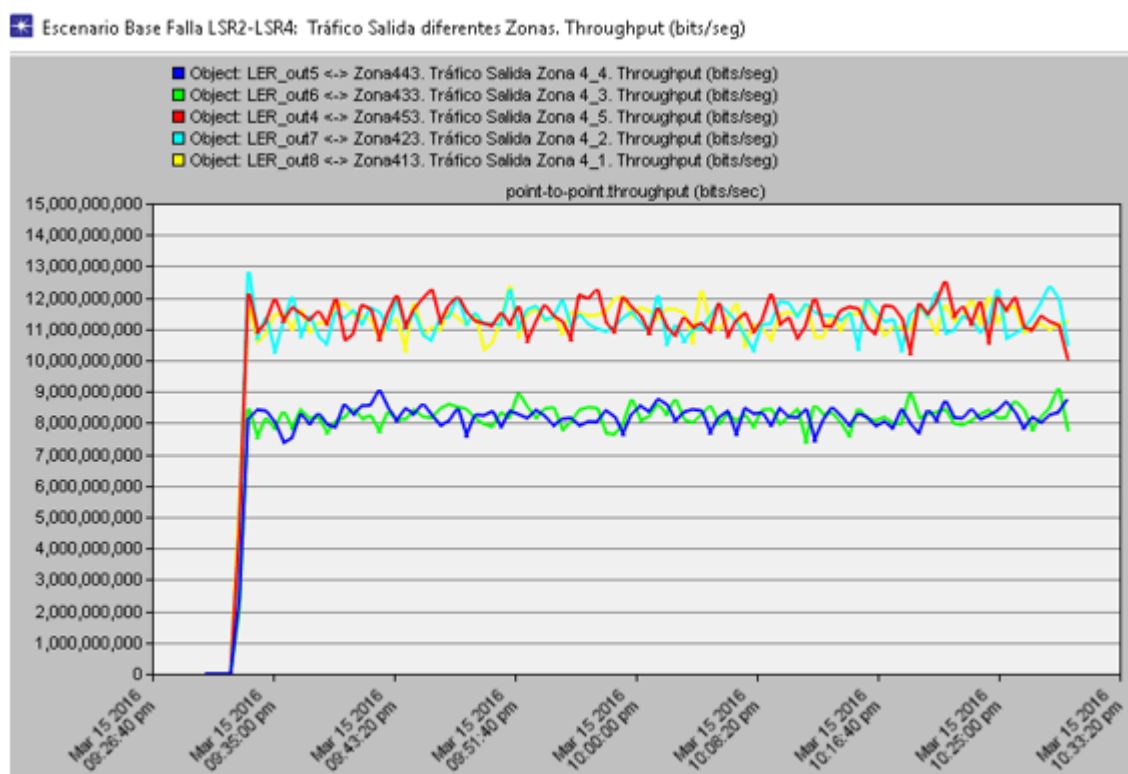
La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3.

En la Figura 4.67 se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.

En la Figura 4.68 se muestra el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.



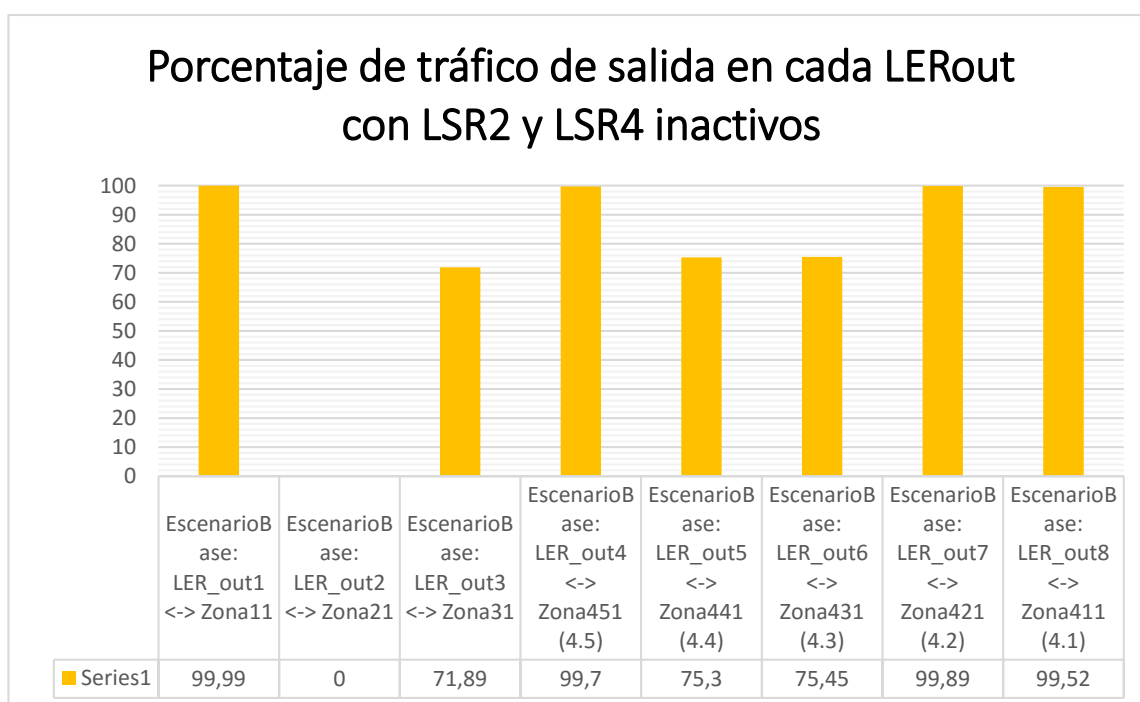
**Figura 4.67:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo



**Figura 4.68:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

El haber perdido el LSR2 y LSR4 ha provocado la pérdida de una gran cantidad de enlaces y, por consiguiente, LSPs, comprometiendo las rutas de tráfico de los servicios de Internet, voz y televisión, tanto principal como de *backup* del LER de salida número 2, perteneciente a la zona 2. Además, se han perdido las LSPs, principal y de *backup*, encargadas de transportar el tráfico de voz y de Internet hacia los *routers* LERout3, perteneciente a la zona 3 y LERout5, perteneciente a la zona 4.

En el siguiente gráfico de barras se observa que con el fallo de los LSRs 2 y 4, el tráfico del LERout2 se ha visto completamente comprometido, perdiendo el 100% de su información, mientras que, LERout3 y LERout5 han perdido aproximadamente el 30% y 20% de su tráfico total, respectivamente, los cuales pertenece a los servicios de voz e Internet.



**Figura 4.69:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

#### Cuarta gráfica:

#### **Routers inactivos: LSR3 y LSR4**

Se simula la caída de los *routers* LSR3 y LSR4, al perder estos nodos se pierden también los siguientes enlaces:

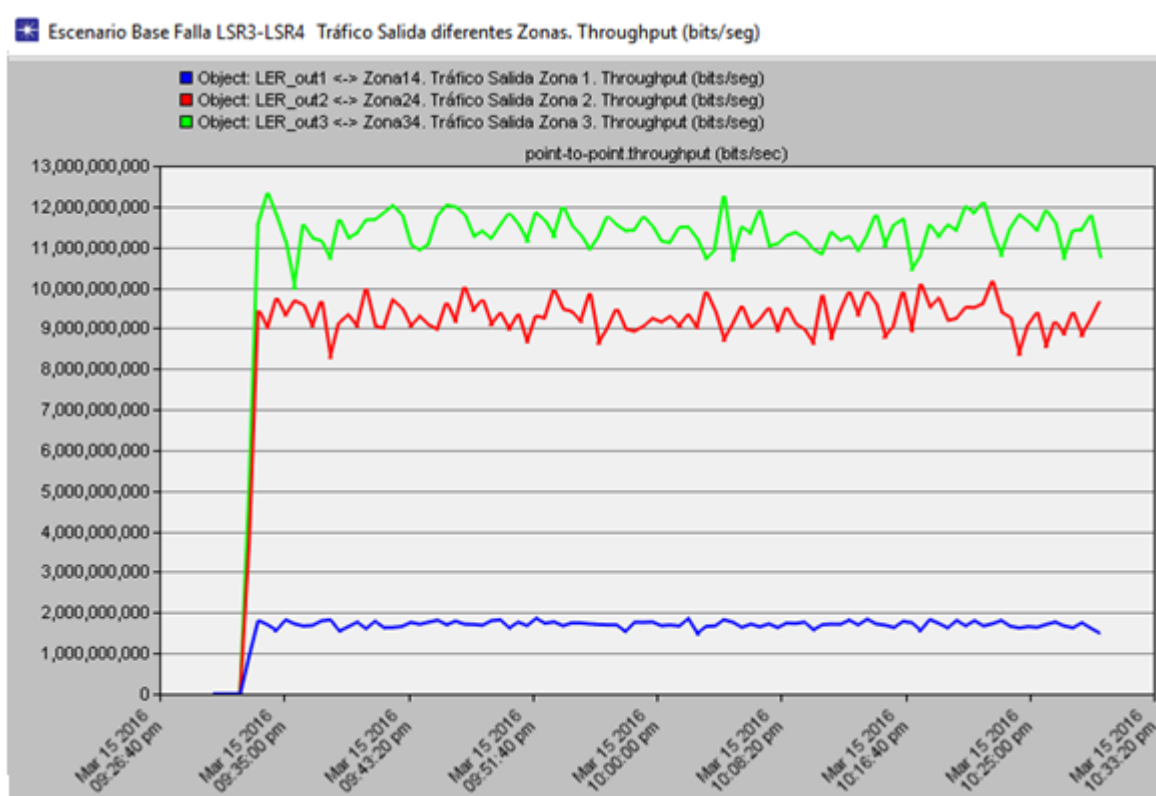
LSR3-LERout8, LSR3-LERout6, LSR3-LERout5, LSR3-LERout3, LERin3-LSR3, LSR1-



LSR3, LSR2-LSR3, LSR3-LSR4, LSR4-LERout1, LSR4-LERout2, LSR4-LERout7, LSR4-LERout6, LERin1-LSR4, LERin2-LSR4, LSR2-LSR4, LSR3-LSR4.

La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3

En la Figura 4.70 se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.

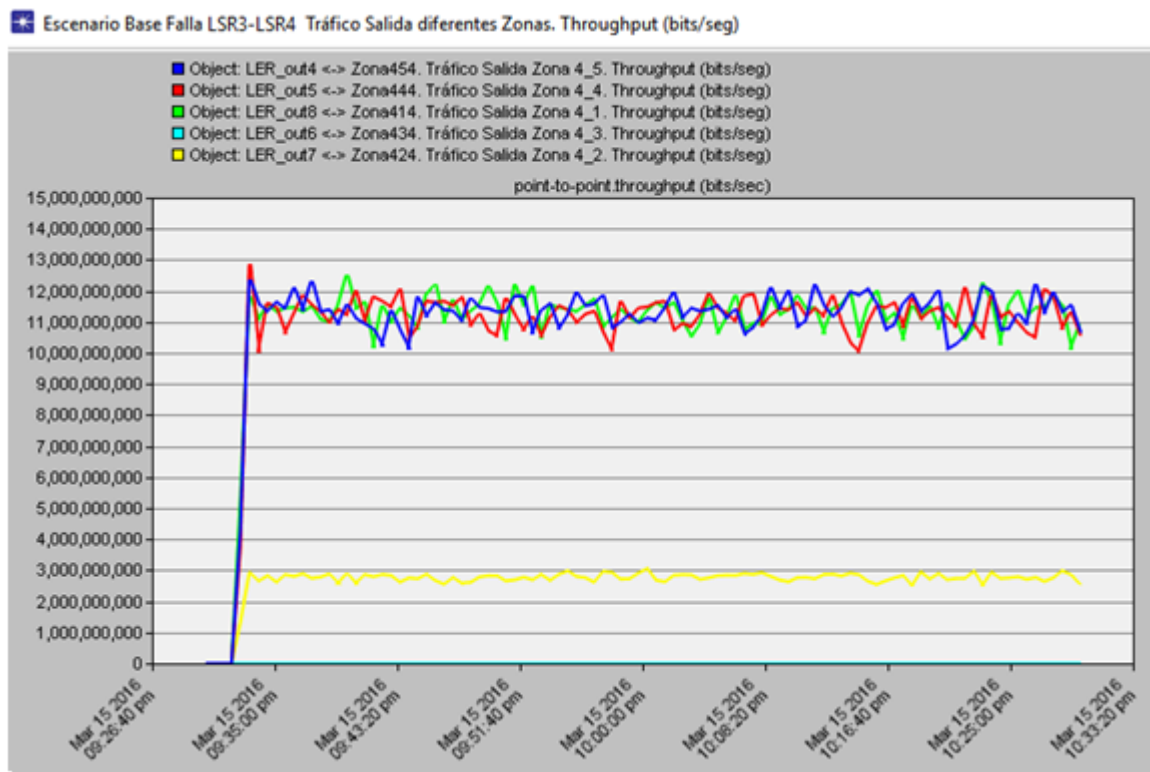


**Figura 4.70:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

En la Figura 4.71 se muestra el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.

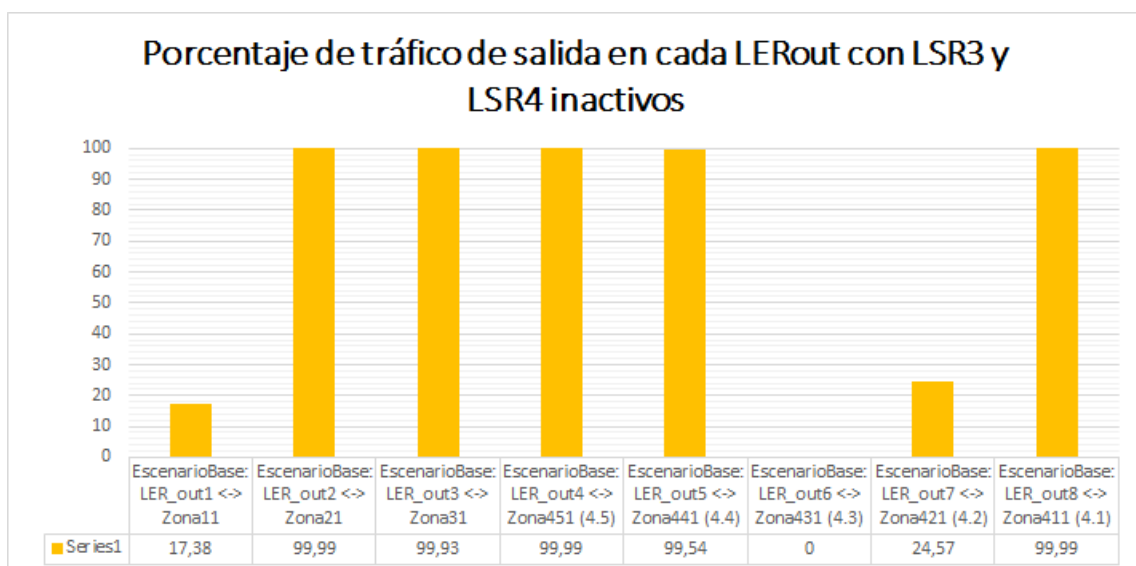
El haber perdido el LSR3 y LSR4 ha provocado la pérdida de una gran cantidad de enlaces y, por consiguiente, LSPs, comprometiendo las rutas de tráfico de los servicios de Internet, voz y televisión, tanto principal como de *backup* del LER de salida número 6, perteneciente a la zona 4. Además, se han perdido las LSPs, principal y de *backup*, encargadas de transportar el tráfico de televisión hacia los *routers* LERout1, perteneciente a la zona 1 y LERout7, perteneciente a la zona 4.





**Figura 4.71:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

En el siguiente gráfico de barras (Figura 4.72) se observa que con el fallo de los LSRs 3 y 4, el tráfico del LERout6 se ha visto completamente comprometido, perdiendo el 100% de su información, mientras que, LERout1 y LERout7 han perdido aproximadamente el 80% de su tráfico total, los cuales pertenece al servicio de televisión.



**Figura 4.72:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

#### 4.5.6 Comportamiento de la red base cuando existe fallo en tres LSRs

En la sección anterior, se aclaró que la pérdida de dos LSRs sería un evento poco convencional y probable consecuencia de la falta de mantenimiento de la red, la pérdida de tres implicaría un grave error en la gestión de la red.

En las gráficas que se presentan más adelante se pretende analizar las consecuencias que la pérdida de tres *routers* LSR tendría en la red. Las curvas expuestas en cada una de las gráficas, pertenecen al *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución pertenecientes a cada uno de los ocho LERs de salida. Para evitar tener demasiadas curvas en una sola gráfica, cada evento se ha dividido en dos gráficas, en donde la primera muestra los resultados de los tres primeros LERs de salida y la segunda los cinco últimos, pertenecientes a la ciudad de Cuenca.

##### Primera gráfica:

##### **Routers inactivos: LSR1, LSR2 y LSR3**

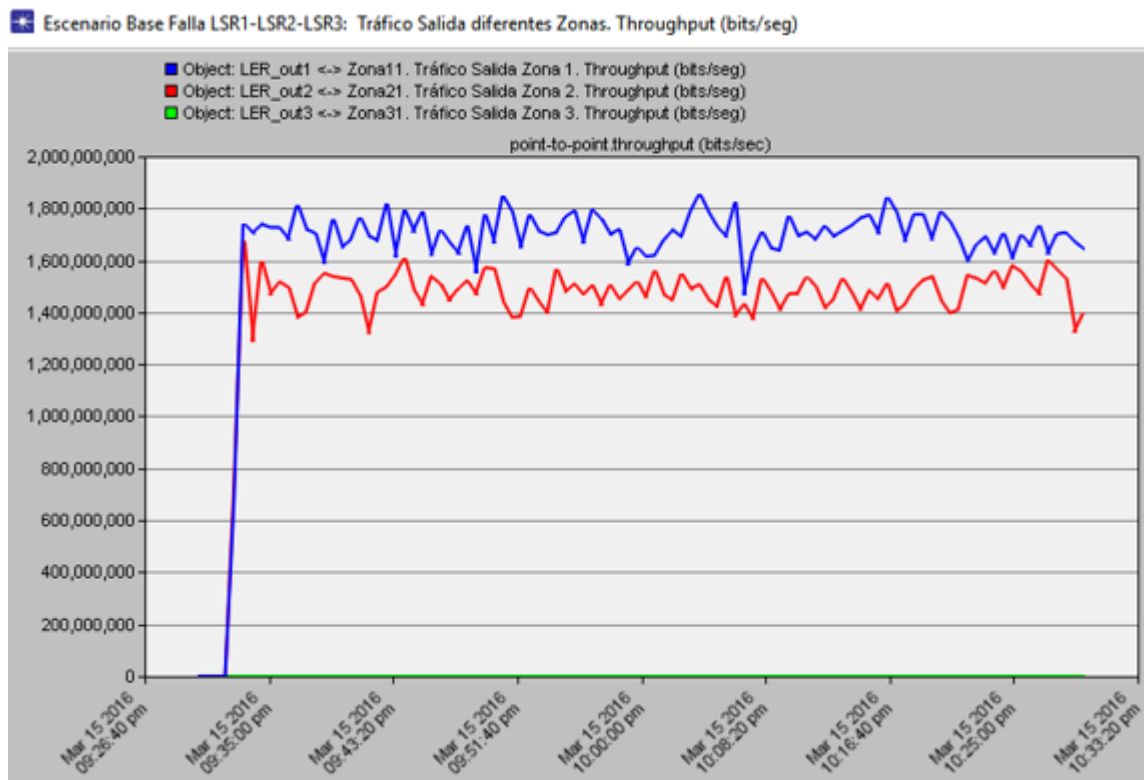
Se simula la caída de los *routers* LSR1, LSR2 y LSR3, al perder estos nodos se pierden también los siguientes enlaces:

LSR1-LERout8, LERin1-LSR1, LERin2-LSR1, LSR1-LSR2, LSR1-LSR3, LSR1-LERout7, LSR1-LERout4, LSR1-LERout1, LSR2-LERout2, LSR2-LERout3, LSR2-LERout4, LSR2-LERout5, LERin3-LSR2, LSR2-LSR3, LSR2-LSR4, LSR3-LERout8, LSR3-LERout6, LSR3-LERout5, LSR3-LERout3, LERin3-LSR3, LSR1-LSR3, LSR2-LSR3, LSR3-LSR4.

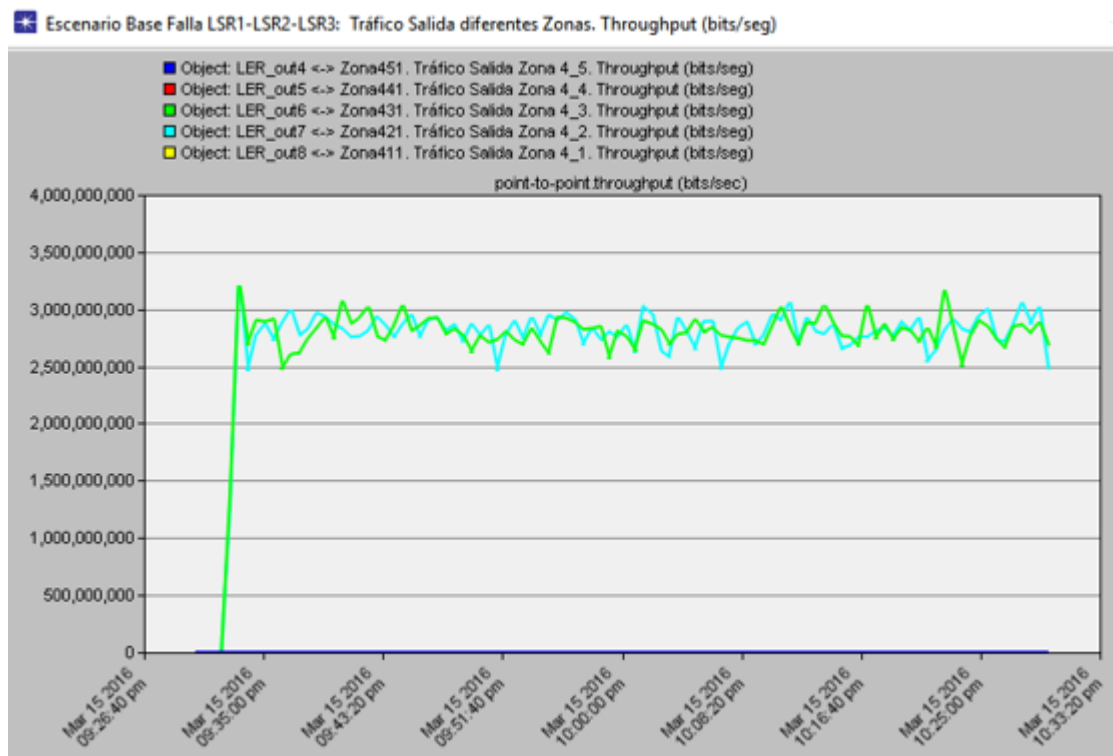
La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3

En la Figura 4.73 se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1, LSR2 y LSR3 se encuentran en estado inactivo.

En la Figura 4.74 se muestra el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1, LSR2 y LSR3 se encuentran en estado inactivo.



**Figura 4.73:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1, LSR2 y LSR3 se encuentran en estado inactivo

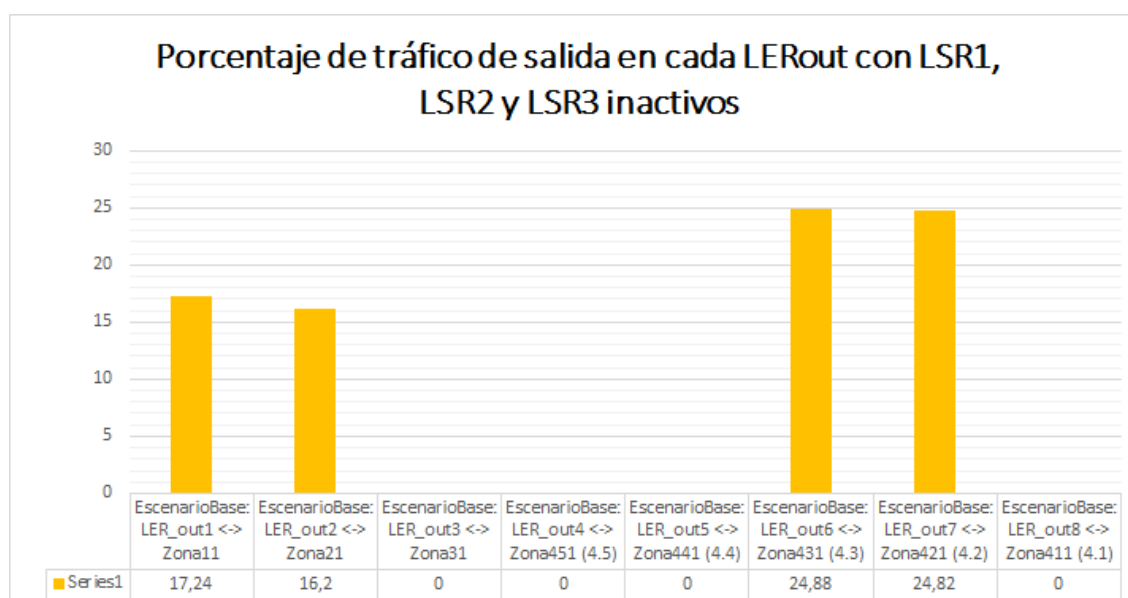


**Figura 4.74:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1, LSR2 y LSR3 se encuentran en estado inactivo

El haber perdido el LSR1, LSR2 y LSR3 ha provocado la pérdida de la mayoría de enlaces y, por consiguiente, LSPs, comprometiendo las rutas de tráfico de los servicios de Internet, voz y televisión, tanto principal como de *backup* de los LER de salida número 3, 4, 5 y 8, pertenecientes a la zona 3 y 4.

Además, se han perdido las LSPs, principal y de *backup*, encargadas de transportar el tráfico de televisión hacia los *routers* LERout1, perteneciente a la zona 1; LERout2, perteneciente a la zona 2; LERout6, perteneciente a la zona 4 y LERout7, perteneciente a la zona 4.

En el siguiente gráfico de barras (Figura 4.75) se observa que con el fallo de los LSRs 1, 2 y 3, el tráfico del LERout3, LERout4, LERout5 y LERout8 se ha visto completamente comprometido, perdiendo el 100% de su información, mientras que, LERout1, LERout2, LERout6 y LERout7 han perdido aproximadamente el 80% y 75% de su tráfico total, los cuales pertenecen al servicio de televisión.



**Figura 4.75:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR1, LSR2 y LSR3 se encuentran en estado inactivo

### Segunda gráfica:

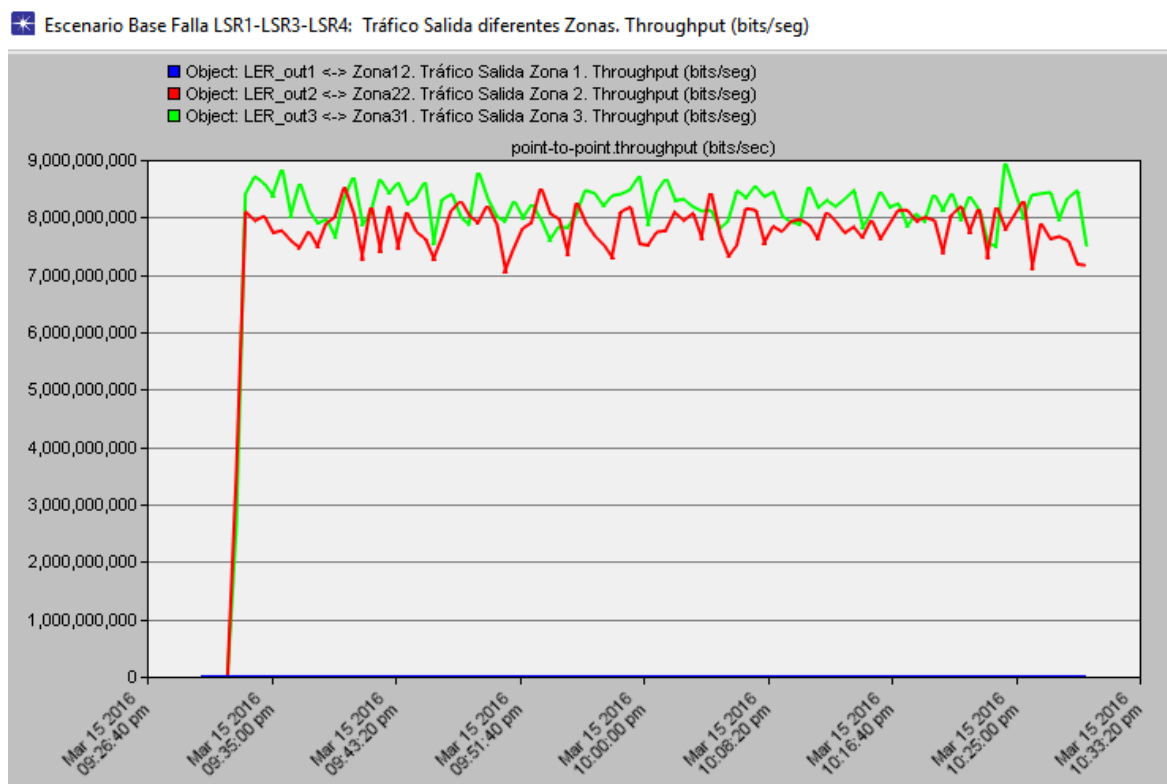
#### **Routers inactivos: LSR1, LSR3 y LSR4**

Se simula la caída de los *routers* LSR1, LSR3 y LSR4, al perder estos nodos se pierden también los siguientes enlaces:

LSR1-LERouter8, LERin1-LSR1, LERin2-LSR1, LSR1-LSR2, LSR1-LSR3, LSR1-LERouter7, LSR1-LERouter4, LSR1-LERouter1, LSR3-LERouter8, LSR3-LERouter6, LSR3-LERouter5, LSR3-LERouter3, LERin3-LSR3, LSR1-LSR3, LSR2-LSR3, LSR3-LSR4, LSR4-LERouter1, LSR4-LERouter2, LSR4-LERouter7, LSR4-LERouter6, LERin1-LSR4, LERin2-LSR4, LSR2-LSR4, LSR3-LSR4.

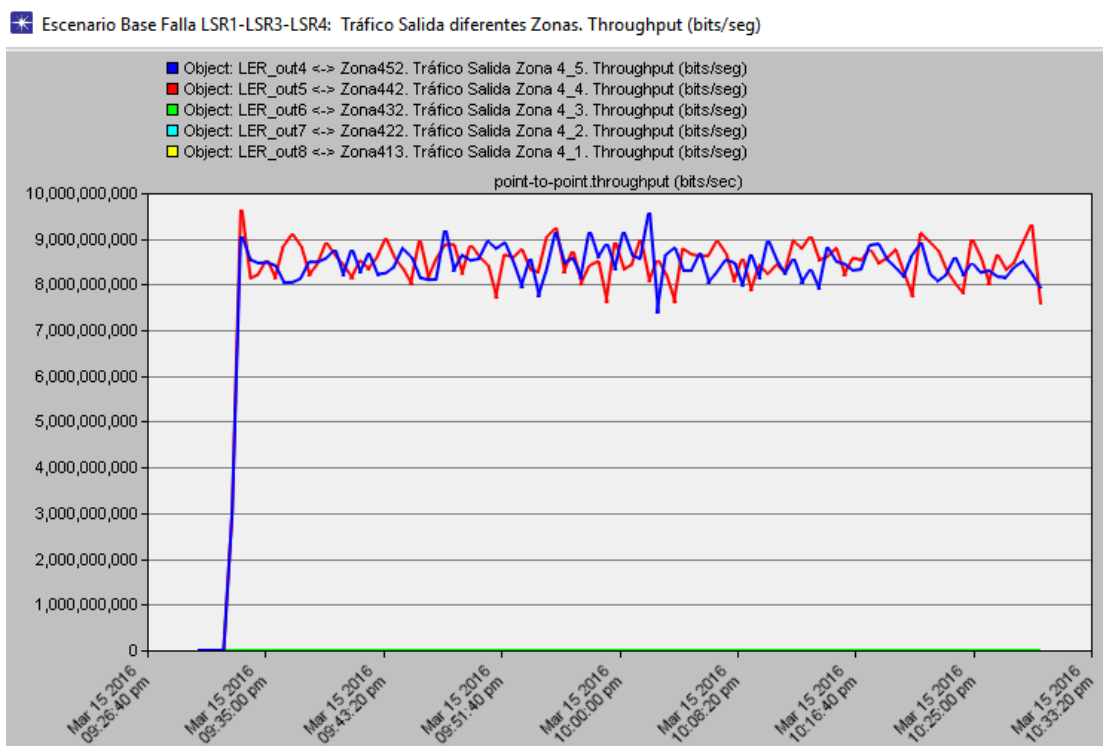
La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3

En la Figura 4.76 se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.



**Figura 4.76:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

En la Figura 4.77 se muestra el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.

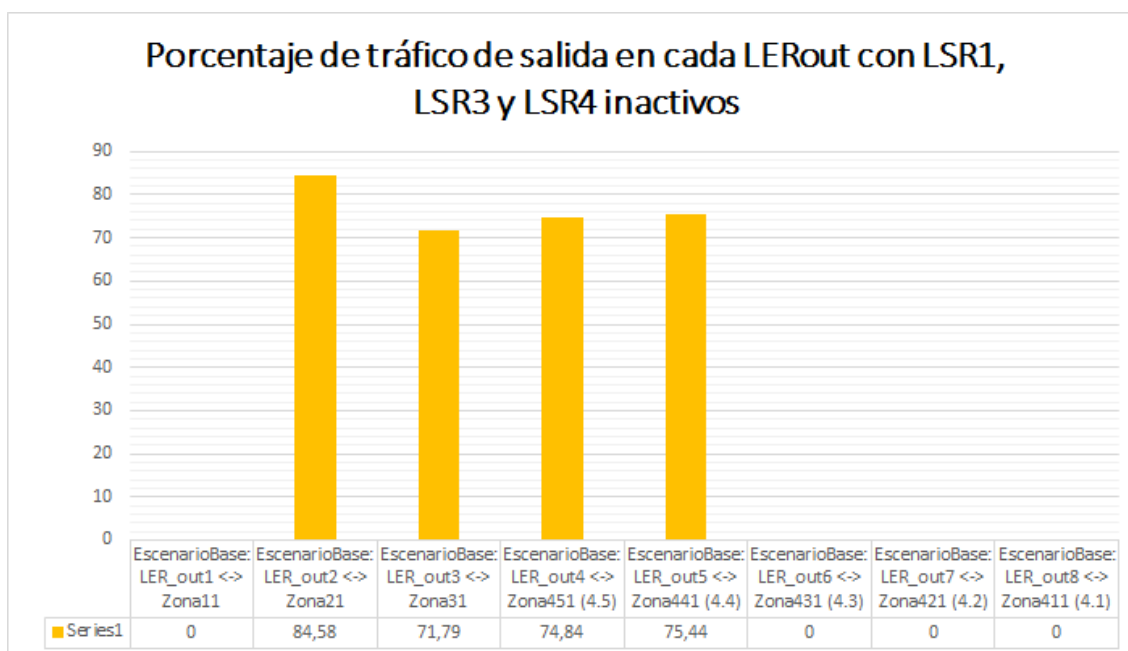


**Figura 4.77:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

El haber perdido el LSR1, LSR3 y LSR4 ha provocado la pérdida de la mayoría de enlaces y por consiguiente LSPs, comprometiendo las rutas de tráfico de los servicios de Internet, voz y televisión, tanto principal como de *backup* de los LER de salida número 1, 6, 7 y 8, pertenecientes a la zona 1 y 4.

Además, se han perdido las LSPs, principal y de *backup*, encargadas de transportar el tráfico de Internet y voz hacia los *routers*: LERout2, perteneciente a la zona 2, LERout3 perteneciente a la zona 3, LERout4 perteneciente a la zona 4 y LERout5 perteneciente a la zona 4.

En el siguiente gráfico de barras (Figura 4.78) se observa que con el fallo de los LSRs 1, 3 y 4, el tráfico del LERout1, LERout6, LERout7 y LERout8 se ha visto completamente comprometido, perdiendo el 100% de su información, mientras que, LERout2, LERout3, LERout4 y LERout5, han perdido aproximadamente el 20% y 30 % de su tráfico total, los cuales pertenece a los servicios de Internet y voz.



**Figura 4.78:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR1, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

### Tercera gráfica:

#### **Routers inactivos: LSR1, LSR2 y LSR4**

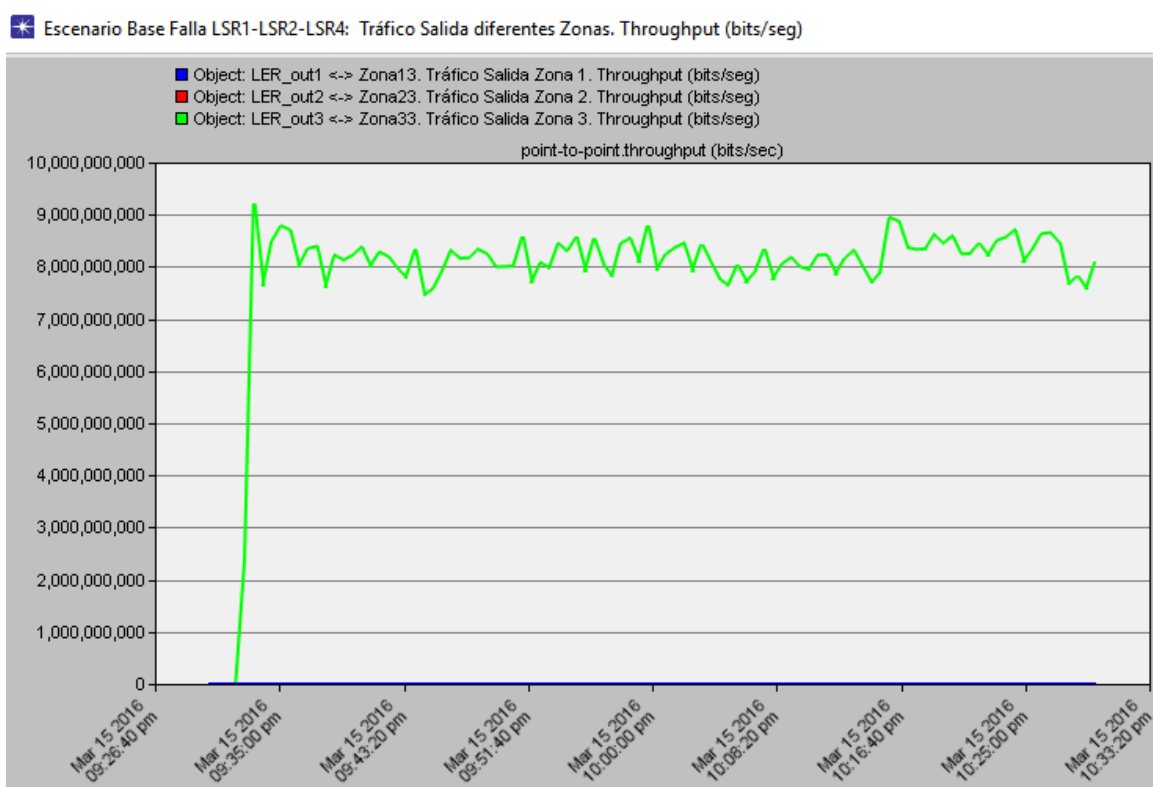
Se simula la caída de los *routers* LSR1, LSR2 y LSR4, al perder estos nodos se pierden también los siguientes enlaces:

LSR1-LERout8, LERin1-LSR1, LERin2-LSR1, LSR1-LSR2, LSR1-LSR3, LSR1-LERout7, LSR1-LERout4, LSR1-LERout1, LSR2-LERout2, LSR2-LERout3, LSR2-LERout4, LSR2-LERout5, LERin3-LSR2, LSR2-LSR1, LSR2-LSR3, LSR2-LSR4, LSR4-LERout1, LSR4-LERout2, LSR4-LERout7, LSR4-LERout6, LERin1-LSR4, LERin2-LSR4, LSR2-LSR4, LSR3-LSR4.

La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3.

En la Figura 4.79 se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1, LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.





**Figura 4.79:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR1, LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

En la Figura 4.80 se muestra el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1, LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.

El haber perdido el LSR1, LSR2 y LSR4 ha provocado la pérdida de la mayoría de enlaces y por consiguiente, LSPs, comprometiendo las rutas de tráfico de los servicios de Internet, voz y televisión, tanto principal como de *backup* de los LER de salida número 1, 2, 4 y 7, pertenecientes a las zonas 1, 2 y 4.

Además, se han perdido las LSPs, principal y de *backup*, encargadas de transportar el tráfico de Internet y voz hacia los *routers*: LERout3, perteneciente a la zona 3, LERout5, LERout6 y LERout8, pertenecientes a la zona 4.

En el gráfico de barras (Figura 4.81) se observa que con el fallo de los LSRs 1, 2 y 4, el tráfico del LERout1, LERout2, LERout4 y LERout7 se ha visto completamente comprometido, perdiendo el 100% de su información, mientras que, LERout3, LERout5, LERout6 y LERout8, han perdido aproximadamente el 30% de su tráfico total, los cuales



pertenece a los servicios de Internet y voz.

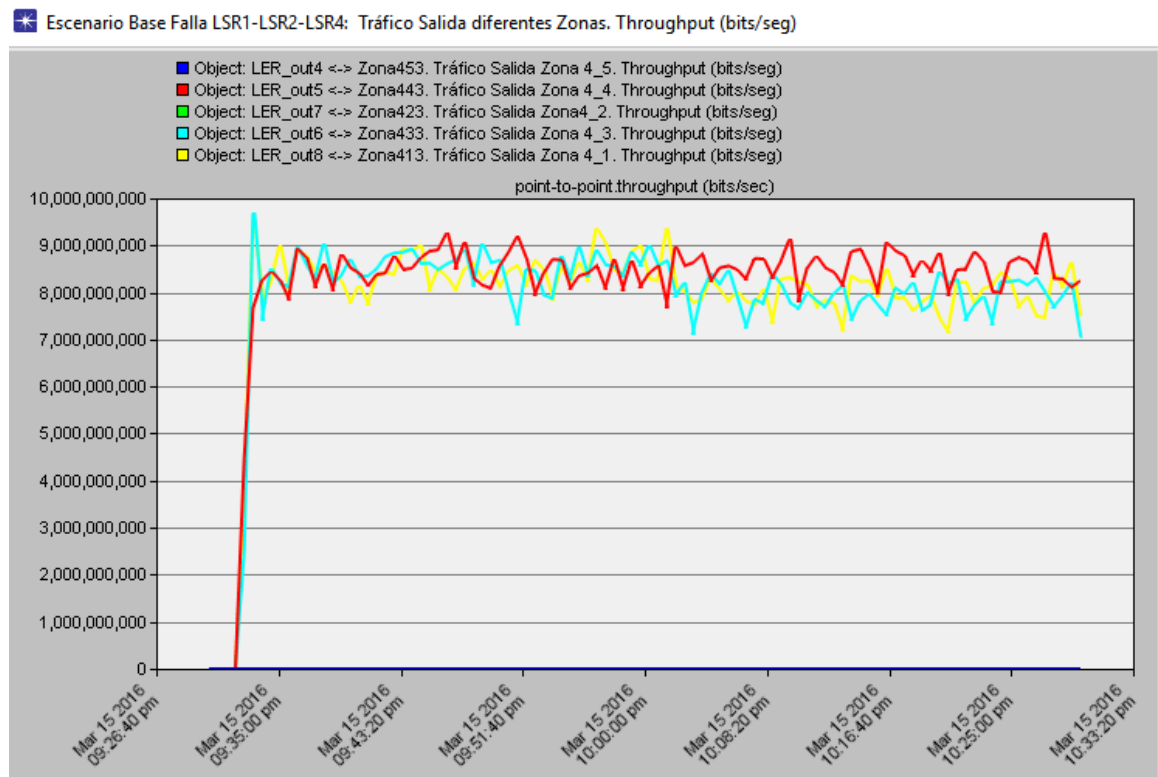


Figura 4.80: *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR1, LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

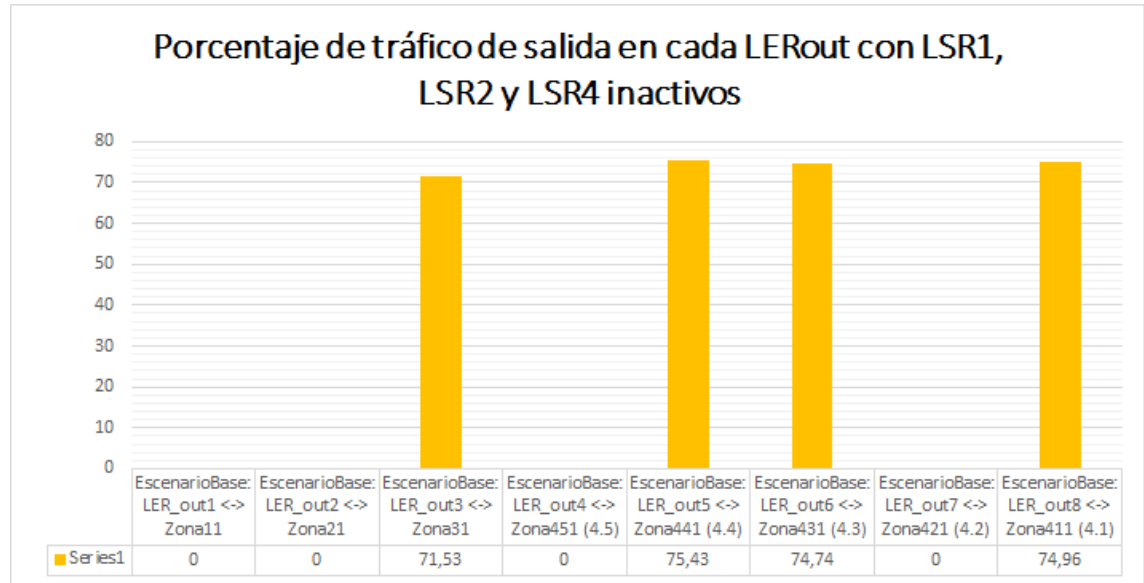


Figura 4.81: Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR1, LSR2 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

### Cuarta gráfica:

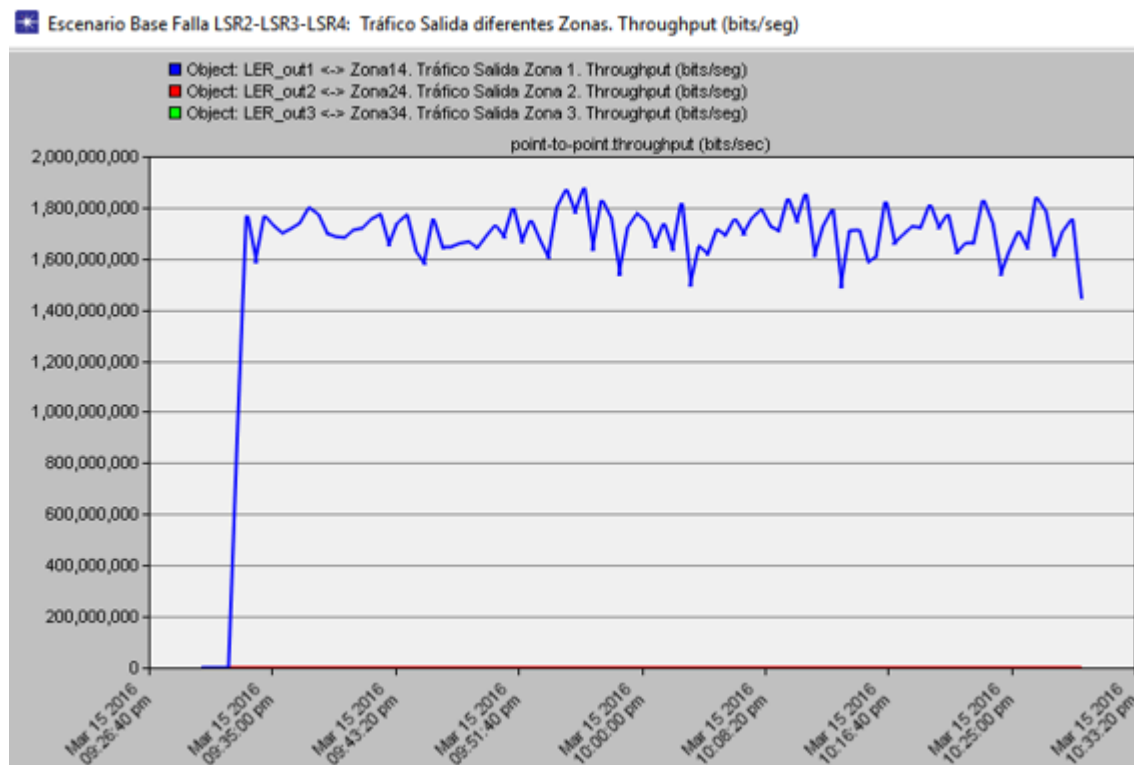
#### **Routers inactivos: LSR2, LSR3 y LSR4**

Se simula la caída de los *routers* LSR2, LSR3 y LSR4, al perder estos nodos se pierden también los siguientes enlaces:

LSR2-LERout2, LSR2-LERout3, LSR2-LERout4, LSR2-LERout5, LERin3-LSR2, LSR2-LSR1, LSR2-LSR3, LSR2-LSR4, LSR3-LERout8, LSR3-LERout6, LSR3-LERout5, LSR3-LERout3, LERin3-LSR3, LSR1-LSR3, LSR2-LSR3, LSR3-LSR4, LSR4-LERout1, LSR4-LERout2, LSR4-LERout7, LSR4-LERout6, LERin1-LSR4, LERin2-LSR4, LSR2-LSR4, LSR3-LSR4.

La pérdida de dichos enlaces implica la pérdida de varios LSPs, especificados en la Tabla 4.3

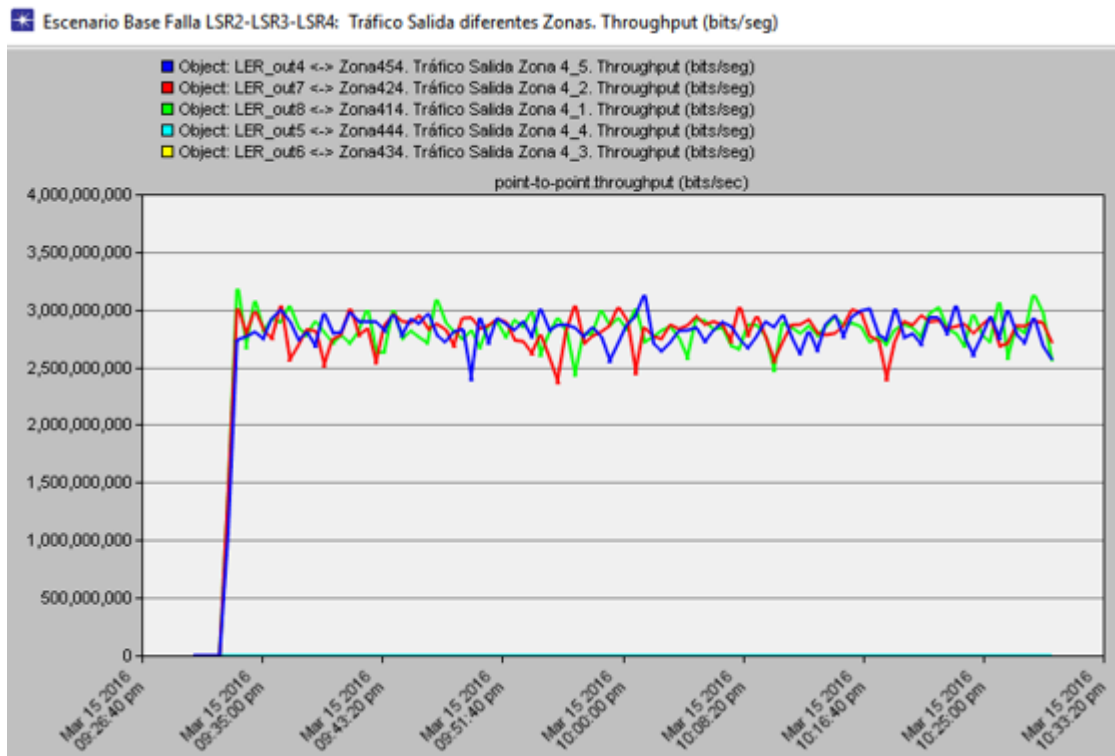
En la siguiente gráfica (Figura 4.82) se exhibe el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR2, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.



**Figura 4.82:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los LER\_out de la zona 1, zona 2 y zona 3 cuando LSR2, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

En la Figura 4.83 se muestra el *throughput* de salida en uno de los cinco *routers*

de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR2, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo.



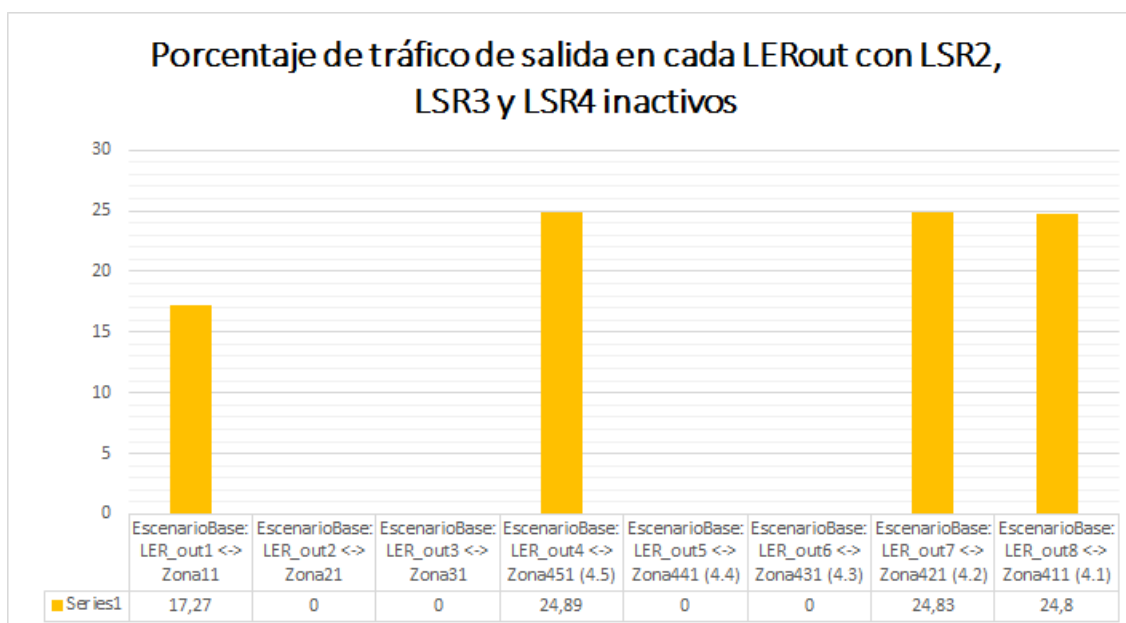
**Figura 4.83:** *Throughput* de salida en uno de los cinco *routers* de distribución de los cinco LER\_out de la zona 4 cuando LSR2, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

El haber perdido el LSR2, LSR3 y LSR4 ha provocado la pérdida de la mayoría de enlaces y por consiguiente, LSPs, comprometiendo las rutas de tráfico de los servicios de Internet, voz y televisión, tanto principal como de *backup* de los LER de salida número 2, 3, 5 y 6, pertenecientes a las zonas 2, 3 y 4. Además se han perdido las LSPs, principal y de *backup*, encargadas de transportar el tráfico de televisión hacia los *routers*: LERout1, perteneciente a la zona 1, LERout4, LERout7 y LERout8, pertenecientes a la zona 4.

Los enlaces perdidos por la falla de los LSRs 2, 3 y 4, y que han comprometido de una manera crítica el flujo de tráfico hacia los LER de salida 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se detallan a continuación: LERin1-LSR4, LERin2-LSR4, LERin3-LSR2, LERin1-LSR1, LERin2-LSR1, LSR1-LSR2, LSR3-LSR1, LSR4-LSR2, LSR4-LSR3, LSR4-LEROUT1, LSR4-LEROUT2, LSR2-LEROUT4, LSR1-LEROUT4.

En el siguiente gráfico de barras (Figura 4.84) se observa que con el fallo de los LSRs 2, 3 y 4, el tráfico del LERout2, LERout3, LERout5 y LERout6 se ha visto

completamente comprometido, perdiendo el 100% de su información, mientras que, LERout1, LERout4, LERout7 y LERout8, han perdido aproximadamente el 80% y 75% de su tráfico total, el cual pertenece al servicio de televisión.



**Figura 4.84:** Comparación del porcentaje de tráfico de salida en cada LER\_out cuando LSR2, LSR3 y LSR4 se encuentran en estado inactivo

#### 4.5.7 Comportamiento de la red base: plan básico vs plan medio

En el diseño realizado en el Capítulo 3 se planteó que el servicio de televisión será ofertado por planes. El diseño base con el cual se ha trabajado en todos los puntos anteriores ha sido dimensionado suponiendo que la mayoría de suscriptores de la provincia del Azuay contratará un plan medio, es decir 12 Megas.

Ahora, en el supuesto caso de que los potenciales suscriptores, por uno u otro motivo optaran por un plan bajo de televisión en lugar de un medio, la red se enfrentaría ante un caso de sobredimensionamiento, es decir, se podría prescindir de ciertos nodos y enlaces, simplificando el diseño original y abaratando costos.

A continuación, se presentan gráficas del comportamiento de la red base cuando el tráfico enviado corresponde a un plan bajo. Se utiliza el programa de MATLAB para generar un nuevo flujo de tráfico, esta vez el plan de televisión utilizado será de 4 Megas.

El ancho de banda total demandado por las distintas zonas de la provincia del Azuay utilizando el plan básico se calcula con MATLAB, se observa a continuación.

	Servicios/Zonas	Ancho de Banda (Mbps)	Total Usuarios (suscriptores)
1	Zona 1	22225	11022
2	Zona 2	20495	9603
3	Zona 3	29857	20879
4	Zona 4	141292	91021

**Figura 4.85:** Ancho de banda total demandado por las distintas zonas de la provincia del Azuay utilizando el plan básico

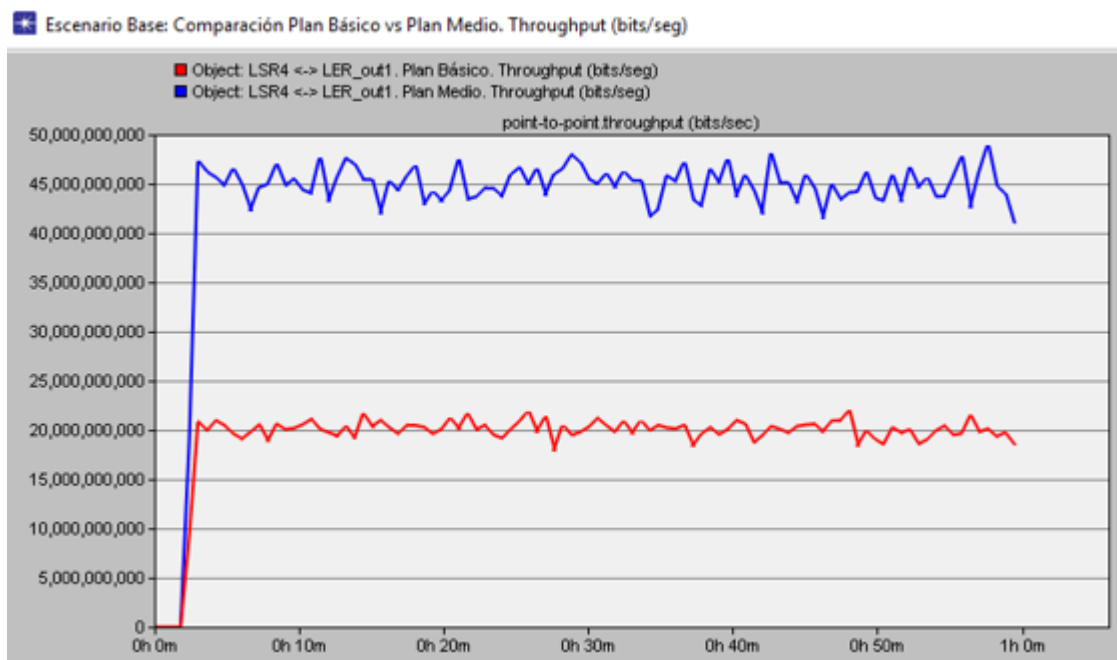
En las gráficas siguientes se exhibe dos curvas en cada Figura, la una corresponde a la utilización del enlace cuando se envía tráfico equivalente a un plan medio, mientras que, la otra representa la utilización del enlace cuando se envía el tráfico producido por un plan bajo.

Son ocho gráficas, una por cada LER de salida. En cada gráfica se observan dos curvas, una por cada plan, medio y básico, las cuales corresponden al *throughput* del enlace. Se considera únicamente el enlace principal

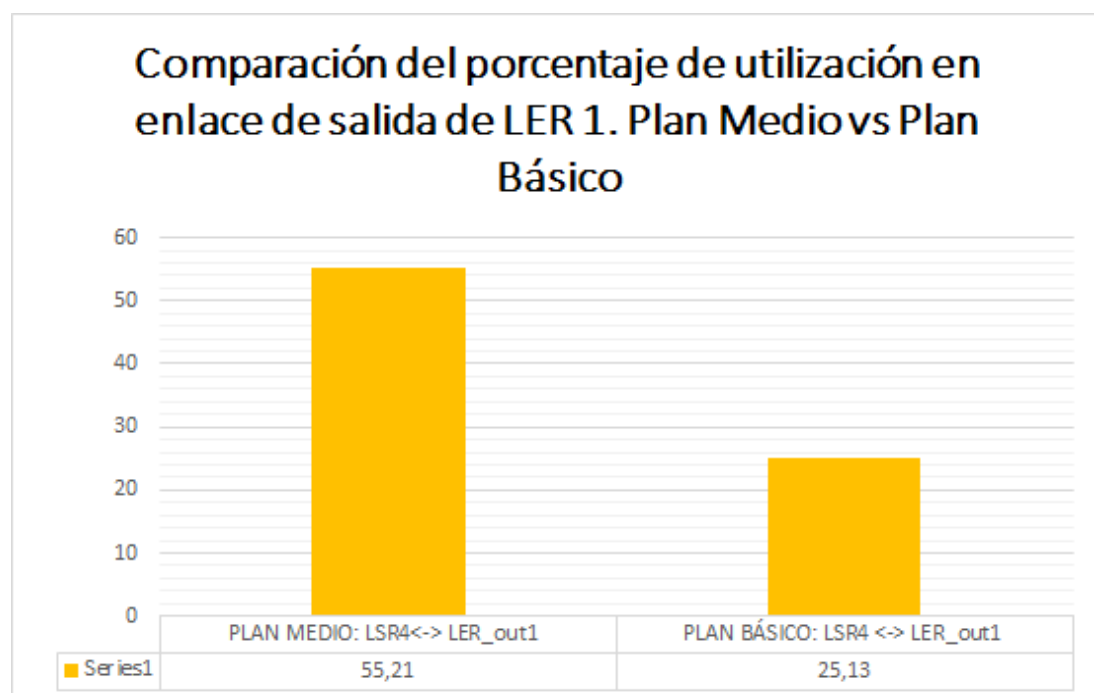
### Primer Caso:

En la Figura 4.86 se analiza el *throughput* del enlace LSR4-LER\_out1, en la curva de color azul se observa que el tráfico correspondiente a un plan medio, es de aproximadamente 45 Gb, en cambio para el plan bajo, curva de color rojo, el tráfico es de apenas 21 Gb, lo que corresponde a menos de la mitad del tráfico que cursa por el enlace cuando se tiene un plan medio.

En la Figura 4.87 que sigue, se realiza una comparación entre los porcentajes de utilización del enlace que lleva el tráfico hacia el LERout1, es decir, de LSR4-LER\_out1. Se observa que el porcentaje de utilización cuando por la red base se envía el tráfico equivalente a un plan básico es de 25%, mientras que, con un plan medio es del 55%, aproximadamente.



**Figura 4.86:** *Throughput* del enlace LSR4-LER\_out1. Curva de color azul, tráfico correspondiente a un plan medio. Curva de color rojo, tráfico correspondiente a un plan bajo



**Figura 4.87:** Comparación del porcentaje de utilización del enlace de salida de LER1 con tráfico correspondiente a un plan medio vs tráfico correspondiente a un plan bajo

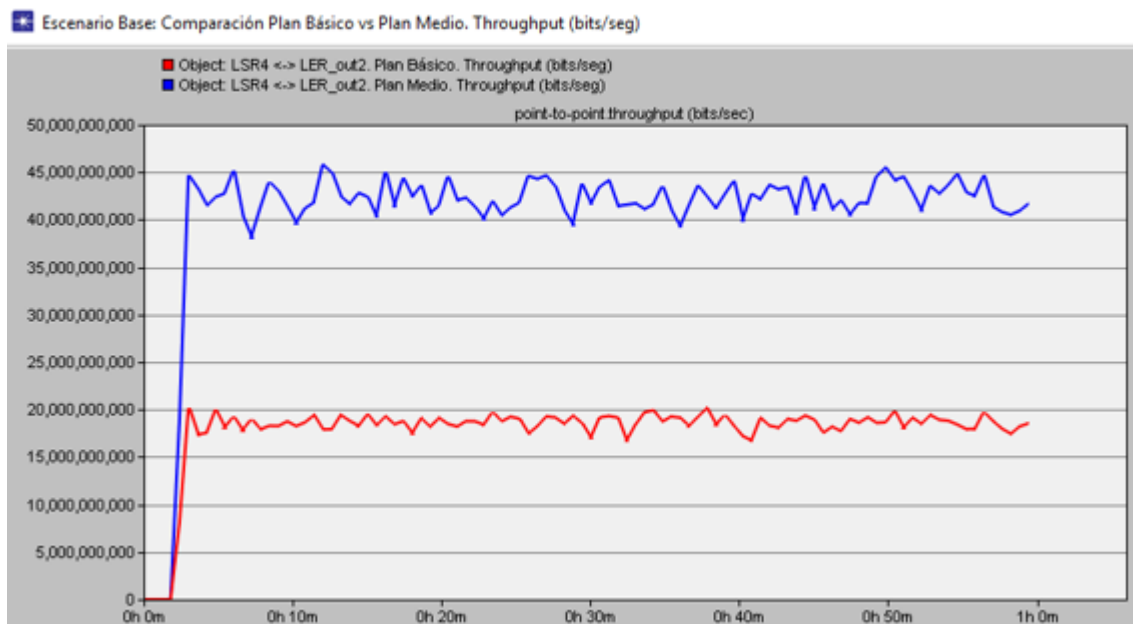
En cuanto al *throughput*, se ha podido ver que el tráfico generado por un plan bajo, 21 Gb, es un poco menos de la mitad del generado por un plan medio. Lo mismo sucede con la utilización del enlace, el tráfico del plan básico ocupa el canal menos de

la mitad de lo que lo hace el tráfico del plan medio. 25% vs 55%.

Por lo tanto, se puede concluir que el enlace LSR4-LER\_out1 perteneciente al diseño de la red base para un tráfico de plan básico está sobredimensionado.

### Segundo caso:

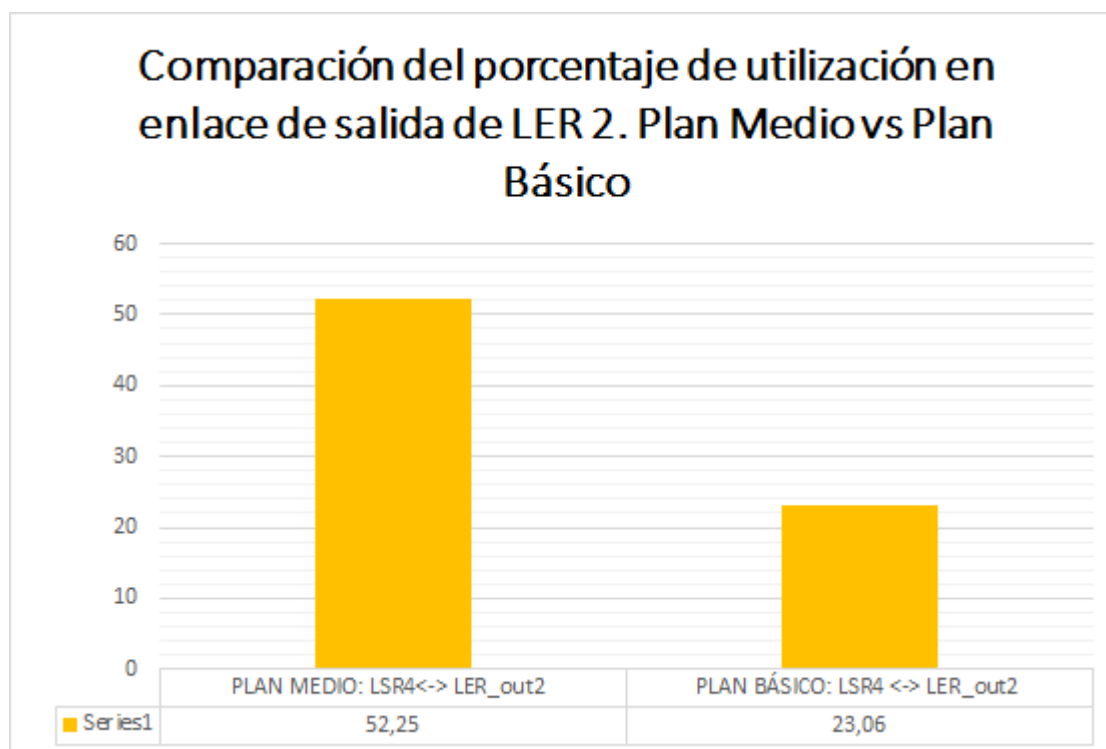
En la Figura 4.88 se analiza el *throughput* del enlace LSR4-LER\_out2, en la curva de color azul se observa que el tráfico correspondiente a un plan medio, es de aproximadamente 44 Gb, en cambio para el plan bajo, curva de color rojo, el tráfico es de apenas 19 Gb, lo que corresponde a menos de la mitad del tráfico que cursa por el enlace cuando se tiene un plan medio.



**Figura 4.88:** *Throughput* del enlace LSR4-LER\_out2. Curva de color azul, tráfico correspondiente a un plan medio. Curva de color rojo, tráfico correspondiente a un plan bajo

En la Figura 4.89, se realiza una comparación entre los porcentajes de utilización del enlace que lleva el tráfico hacia el LERout2, es decir, de LSR4-LER\_out2.

Se observa que el porcentaje de utilización cuando por la red base se envía el tráfico equivalente a un plan básico es de 22%, mientras que, con un plan medio es del 51%, aproximadamente.



**Figura 4.89:** Comparación del porcentaje de utilización del enlace de salida de LER2 con tráfico correspondiente a un plan medio vs tráfico correspondiente a un plan bajo

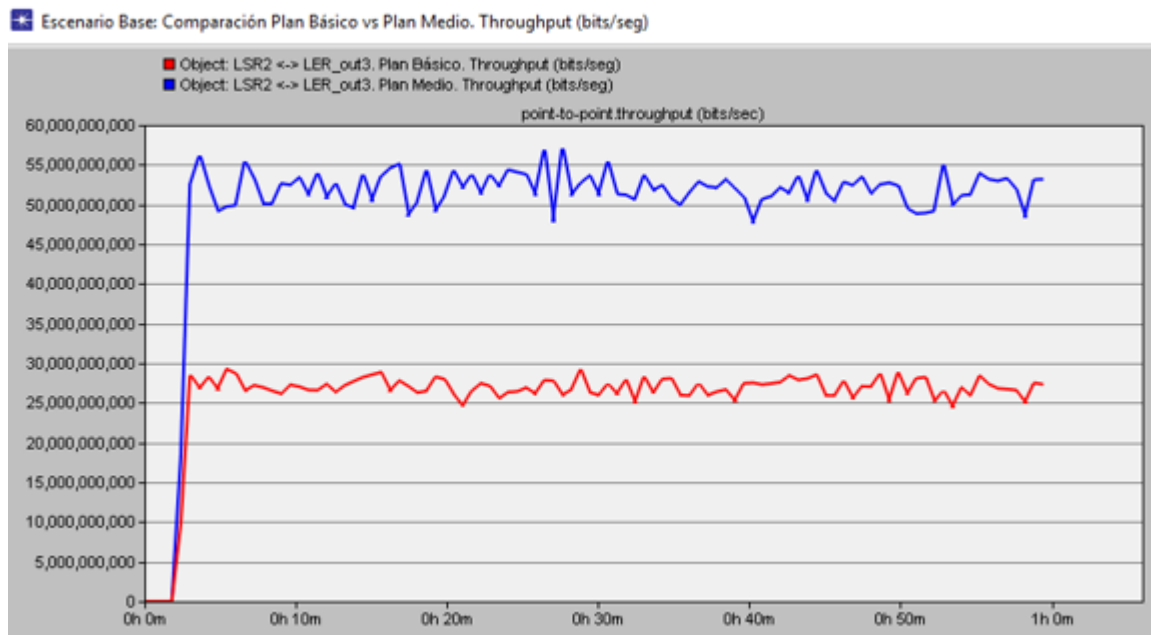
En cuanto al *throughput*, se ha podido ver que el tráfico generado por un plan bajo, 19 Gb, es un poco menos de la mitad del generado por un plan medio, 44 Gb.

Lo mismo sucede con la utilización del enlace, el tráfico del plan básico ocupa el canal menos de la mitad de lo que lo hace el tráfico del plan medio. 22% vs 51%. Por lo tanto, se puede concluir que el enlace LSR4-LER\_out2 perteneciente al diseño de la red base para un tráfico de plan básico está sobredimensionado.

### Tercer caso:

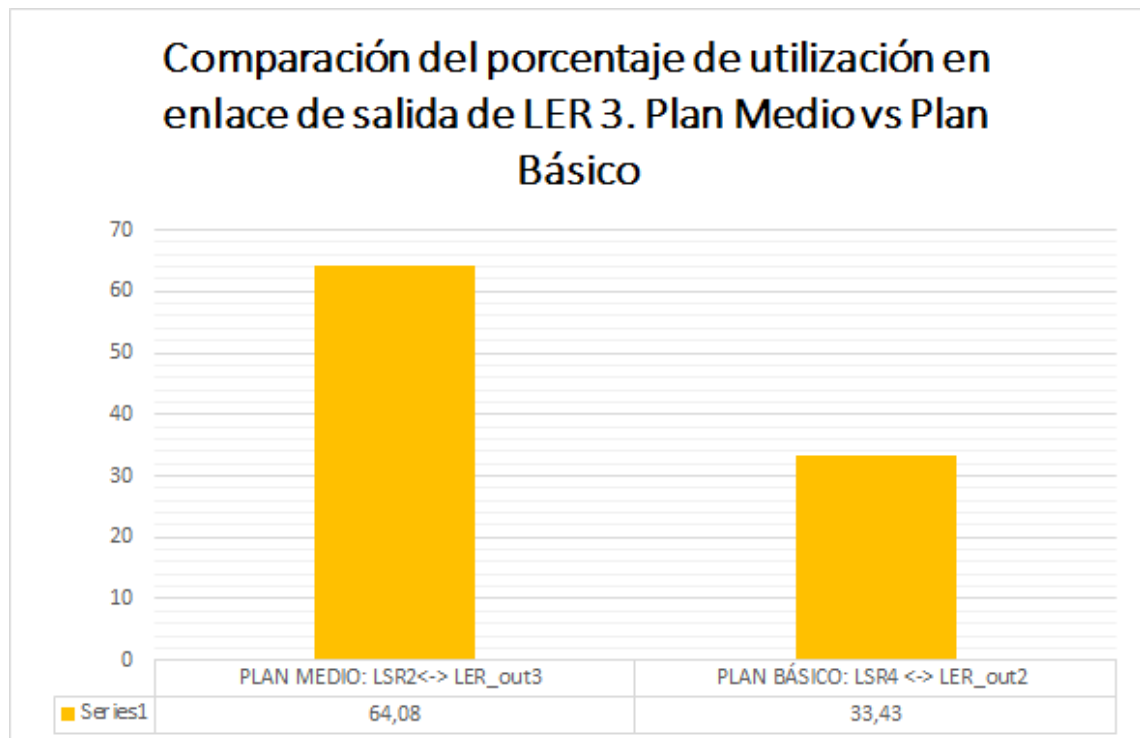
En la Figura 4.90 se analiza el *throughput* del enlace LSR2-LER\_out3, en la curva de color azul se observa que el tráfico correspondiente a un plan medio, es de aproximadamente 48 Gb, en cambio para el plan bajo, curva de color rojo, el tráfico es de apenas 27 Gb, lo que corresponde a un poco más de la mitad del tráfico que cursa por el enlace cuando se tiene un plan medio.





**Figura 4.90:** *Throughput* del enlace LSR2-LER\_out3. Curva de color azul, tráfico correspondiente a un plan medio. Curva de color rojo, tráfico correspondiente a un plan bajo

En la Figura 4.91 que sigue, se realiza una comparación entre los porcentajes de utilización del enlace que lleva el tráfico hacia el LERout3, es decir, de LSR2-LER\_out3. Se observa que el porcentaje de utilización cuando por la red base se envía el tráfico equivalente a un plan básico es de 32%, mientras que, con un plan medio es del 62%, aproximadamente.



**Figura 4.91:** Comparación del porcentaje de utilización del enlace de salida de LER3 con tráfico correspondiente a un plan medio vs tráfico correspondiente a un plan bajo

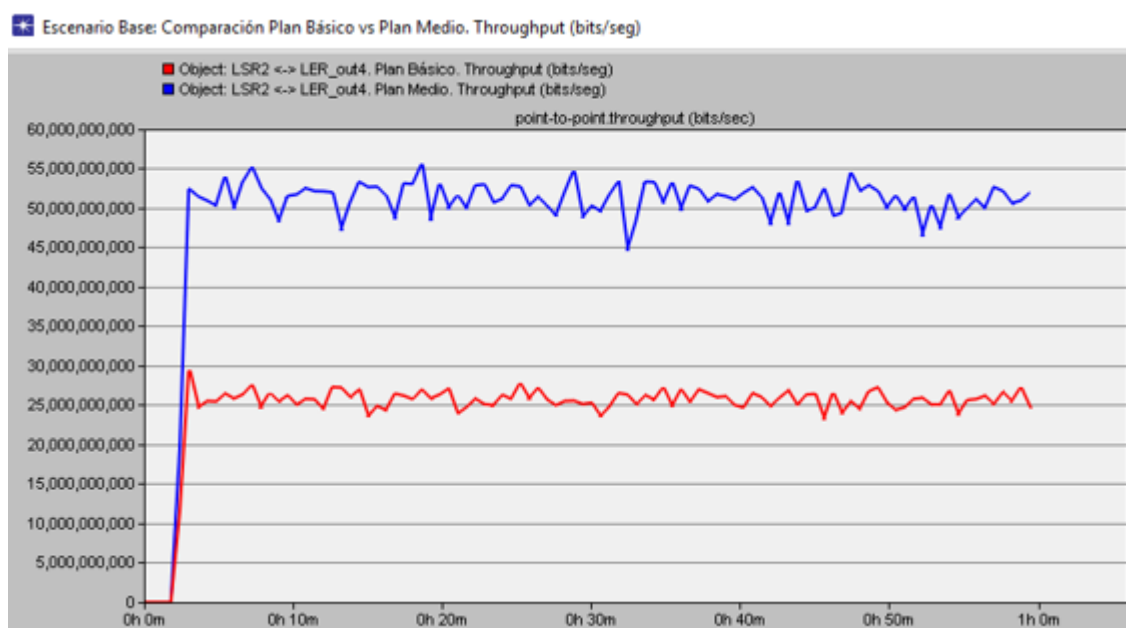
En cuanto al *throughput*, se ha podido ver que el tráfico generado por un plan bajo, 27 Gb, es un poco más de la mitad del generado por un plan medio, 48 Gb. Lo mismo sucede con la utilización del enlace, el tráfico del plan básico ocupa el canal un poco más de la mitad de lo que lo hace el tráfico del plan medio. 32% vs 62%.

Por lo tanto, se puede concluir que el enlace LSR2-LER\_out3 perteneciente al diseño de la red base para un tráfico de plan básico está sobredimensionado.

#### Cuarto caso:

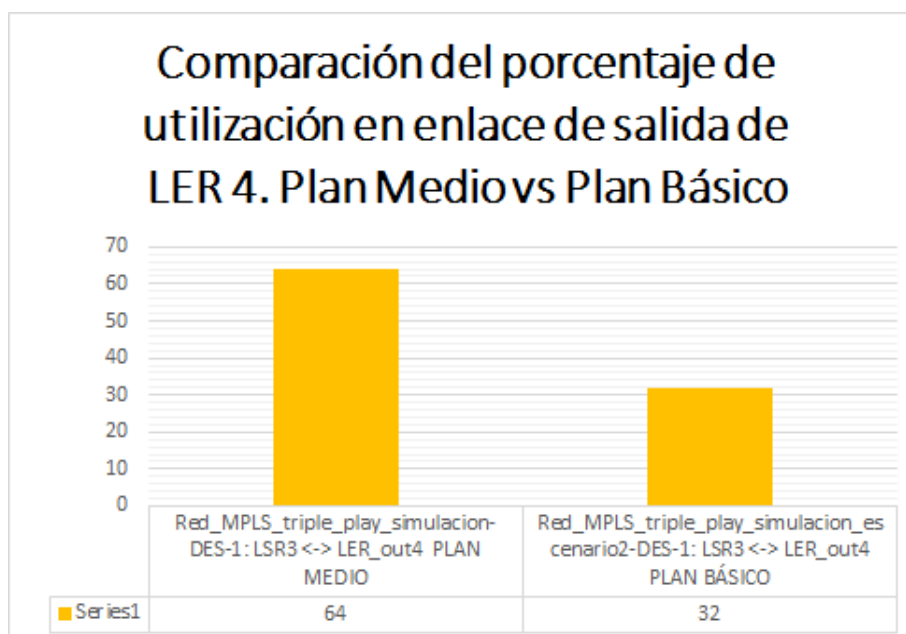
En la zona 4, el tráfico total requerido por el cantón Cuenca ha sido equitativamente repartido entre cinco LERs de salida, razón por la cual en la gráfica a continuación se realiza el análisis del *throughput* de los enlaces LSR2-LER\_out4, LSR3-LER\_out6, LSR3-LER\_out6, LSR1-LER\_out7 y LSR1-LER\_out8. La Figura 4.92 pertenece al LSR2-LER\_out4, pero representa a todos los enlaces de la zona 4, ya que tanto el tráfico como la capacidad del enlace es el mismo.

Se analiza el *throughput* del enlace LSR2-LER\_out4, en la Figura 4.92 se observa en la curva azul se observa que el tráfico correspondiente a un plan medio, es de aproximadamente 52 Gb, en cambio para el plan bajo, curva de color rojo, el tráfico es de 26 Gb, lo que corresponde a la mitad del tráfico que cursa por el enlace cuando se tiene un plan medio.



**Figura 4.92:** *Throughput* del enlace LSR2-LER\_out4. Curva de color azul, tráfico correspondiente a un plan medio. Curva de color rojo, tráfico correspondiente a un plan bajo

En la Figura 4.93, se realiza una comparación entre los porcentajes de utilización del enlace que lleva el tráfico hacia el LERout4, es decir, de LSR2-LER\_out4. Se observa que el porcentaje de utilización cuando por la red base se envía el tráfico equivalente a un plan básico es de 31%, mientras que, con un plan medio es del 63%, aproximadamente.



**Figura 4.93:** Comparación del porcentaje de utilización del enlace de salida de LER4 con tráfico correspondiente a un plan medio vs tráfico correspondiente a un plan bajo

En cuanto al *throughput*, se ha podido ver que el tráfico generado por un plan bajo, 26 Gb, es equivalente a la mitad del generado por un plan medio, 52 Gb. Lo mismo sucede con la utilización del enlace, el tráfico del plan básico ocupa el canal la mitad de lo que lo hace el tráfico del plan medio. 32% vs 64%.

Por lo tanto, se puede concluir que los enlaces LSR2-LER\_out4, LSR3-LER\_out6, LSR3-LER\_out6, LSR1-LER\_out7 y LSR1-LER\_out8 perteneciente al diseño de la red base para un tráfico de plan básico están sobredimensionados.

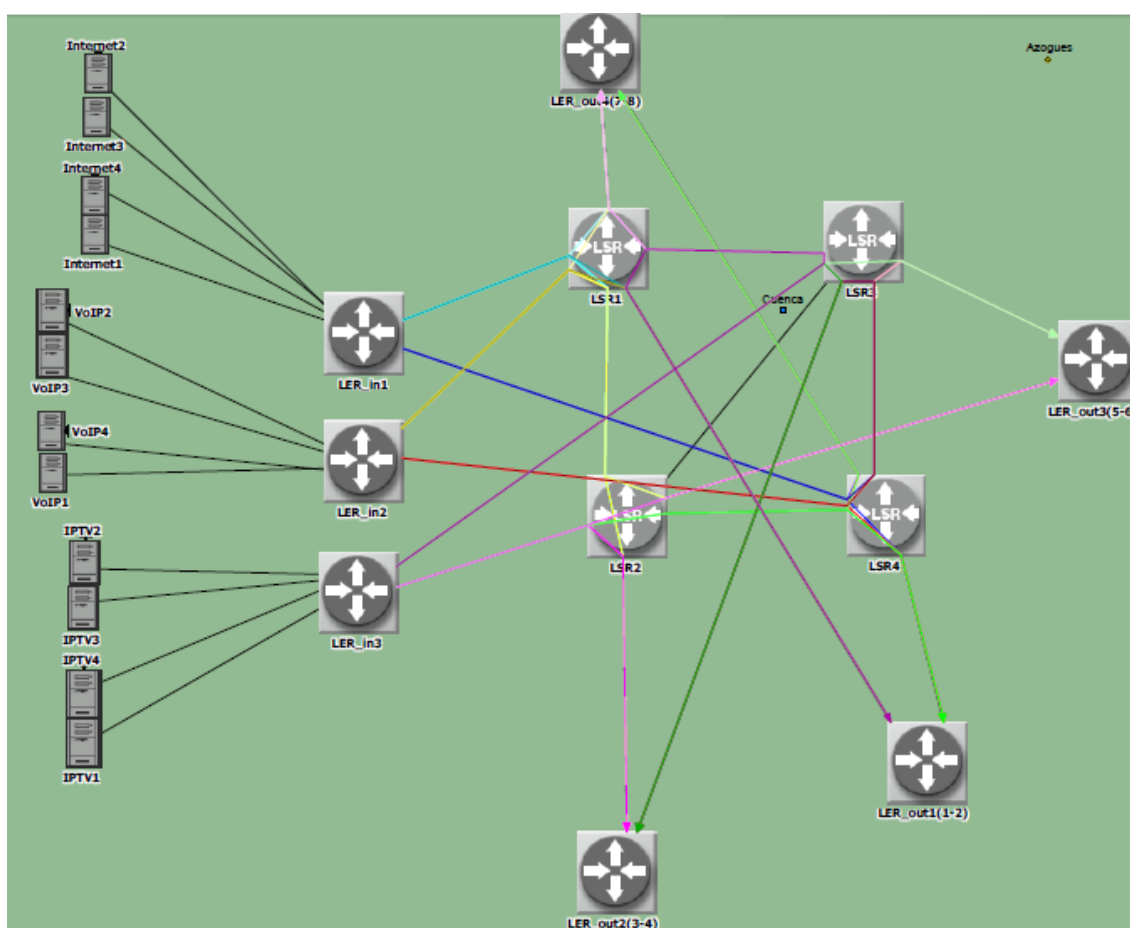
Luego de haber analizado la utilización y el *throughput* de cada uno de los enlaces, se concluye que, para un plan básico, la red base está sobredimensionada de tal manera que se crea un nuevo escenario con los equipos suficientes para dar soporte al tráfico generado por el plan básico.

## Escenario diseñado para plan básico

En el análisis del punto anterior se observó que todos los enlaces del diseño de red base, se encuentran sobredimensionados con el doble del valor necesario para transmitir el tráfico generado por el plan básico.

Se ha creado un nuevo diseño de red el cual consiste de cuatro LERs de salida en lugar de ocho. La cantidad de LSRs se mantienen para posible futuro crecimiento de tráfico.

En este nuevo diseño, un solo *router* LER de salida enviará el tráfico hacia dos zonas, es decir, LERout1\_2 se encargará de transmitir el tráfico generado por zona 1 y zona 2, en el caso del cantón Cuenca, el tráfico que fluía por los cinco LERs, lo hará por solo 2 y el *router* restante transmitirá el tráfico de Cuenca y el de la zona 3.



**Figura 4.94:** Escenario Solución: Diseño de red solución en el caso del escenario con plan básico

#### 4.5.8 Comportamiento de la red base: plan medio vs plan alto

El siguiente escenario muestra la comparación entre el plan medio y el plan alto. Plan medio representa los planes calculados para cada servicio *Triple Play* en la red base.

En cambio, para un plan alto se maneja un diferente ancho de banda en televisión para la zona 4, que pertenece a Cuenca en donde el plan será de 26 megas haciendo referencia a un plan HD de televisión.

Se ha asignado este plan solo a Cuenca dado que el índice de desarrollo económico es mayor en esta zona y la población representa el 70% del total en la provincia (Datos obtenidos en el capítulo 3 en la parte de diseño de la red).

En las siguientes gráficas se analizará el *throughput* de los LER de salida de la zona 4 (4-8) pues son los involucrados con el cambio a un plan alto, además se comparará el porcentaje de utilización de cada enlace y se observará si la capacidad en cada uno es adecuada para mantener el servicio con el nuevo plan, en caso de que el escenario no soporte los nuevos requerimientos de la red se planteará un escenario alternativo que soporte el tráfico en la misma.

En MATLAB se configura la nueva carga, manteniendo en la Zona uno, dos y tres los mismos planes y cambiando a la Zona 4 a un plan alto (la configuración del plan en MATLAB se observa en el Anexo B), los resultados calculados por el *software* son:

	Servicios/Zonas	Ancho de Banda (Mbps)	Total Usuarios (suscriptores)
1	VoIP	1065	91021
2	IPTV	460356	
3	Datos	69404	
4	Total	530825	

**Figura 4.95:** Tráfico calculado para la red núcleo con plan alto

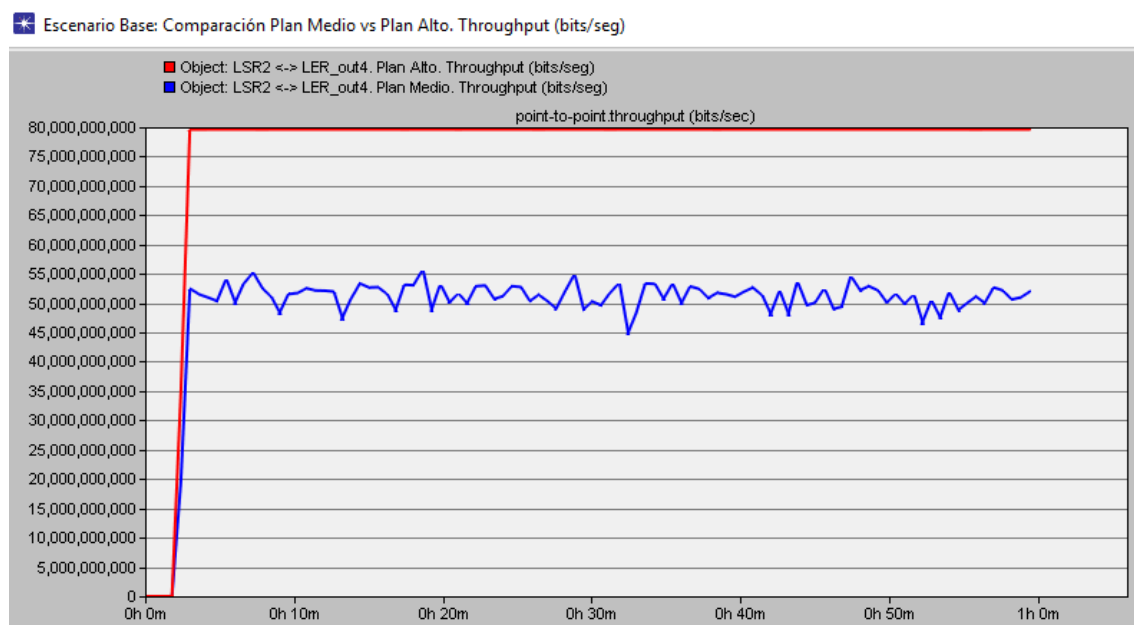
En el primer escenario analizado (sección 4.5.1) se observa los resultados del tráfico necesario para un plan medio en las zonas uno, dos y tres, en este análisis estas zonas mantienen el tráfico calculado para dicho plan.

Los enlaces analizados son solo los que corresponden a la ruta principal que

representan el 90% del tráfico que se dirige a cada LER de la zona 4, se considera que para el análisis estos resultados representan el comportamiento de la red de manera que se pueda describir el funcionamiento de la misma.

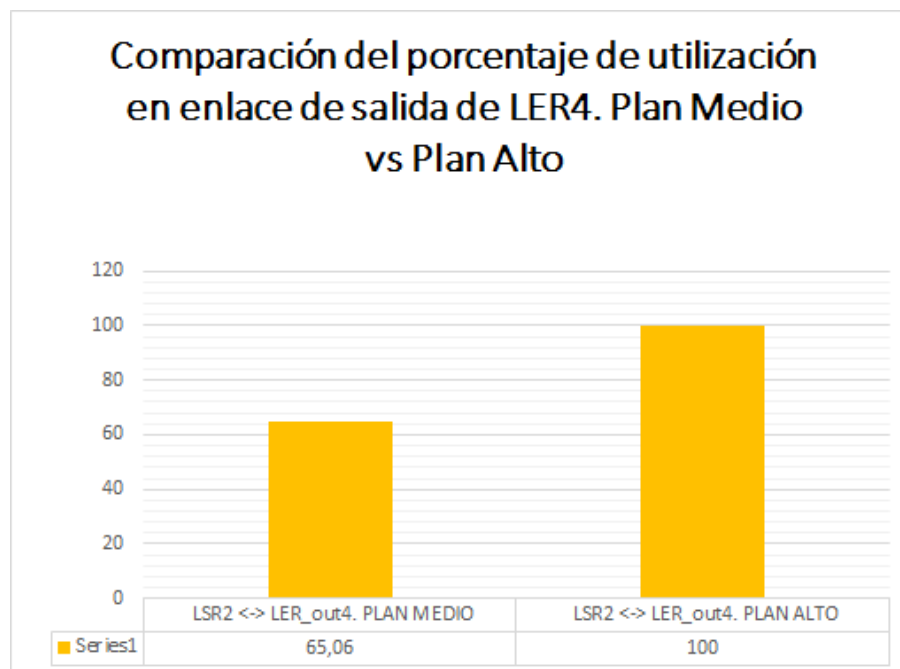
### Primer Caso:

En la Figura 4.96 se analiza el *throughput* del enlace LSR2-LER\_out4, en la curva azul se observa que el tráfico que sale por el LER correspondiente a un plan medio es de 55 Gb, en cambio para el plan alto el tráfico sobrepasa los 80 Gb que es el límite del enlace.



**Figura 4.96:** Escenario base: Comparación del *Throughput* entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR2-LER\_out4

Se evalúa el comportamiento del enlace de entrada en el LER\_out4, el mismo muestra en la Figura 4.97 el porcentaje de utilización del enlace para el plan medio y alto, se observa que en el plan medio el porcentaje de utilización es del 65 % aproximadamente, en contraposición la utilización en el plan alto muestra una ocupación del 100 %.



**Figura 4.97:** Escenario base: Comparación de Porcentaje Utilización entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR2-LER\_out4

En el caso del *throughput* se detalla que el tráfico para el plan alto es de 80 Gb este valor excede a la capacidad del enlace que es de 79 Gb. Tomando en cuenta el tráfico total para televisión de la zona 4 con un plan medio dado por la tabla 460 Gb, se divide el tráfico para los 5 LER de salida en la zona 4.

La división es posible porque en el diseño se repartió el tráfico de forma equitativa, cada zona soporta 92 Gb, como el enlace analizado representa el 90% del total del tráfico en realidad el enlace LSR2-LER\_out4 debe soportar 83Gb, con esto la información ya no se transmitirá a la velocidad del enlace 79 Gbps si no que le tomará más tiempo. Con esto el retardo aumenta y se dejará de garantizar una calidad de la señal adecuada.

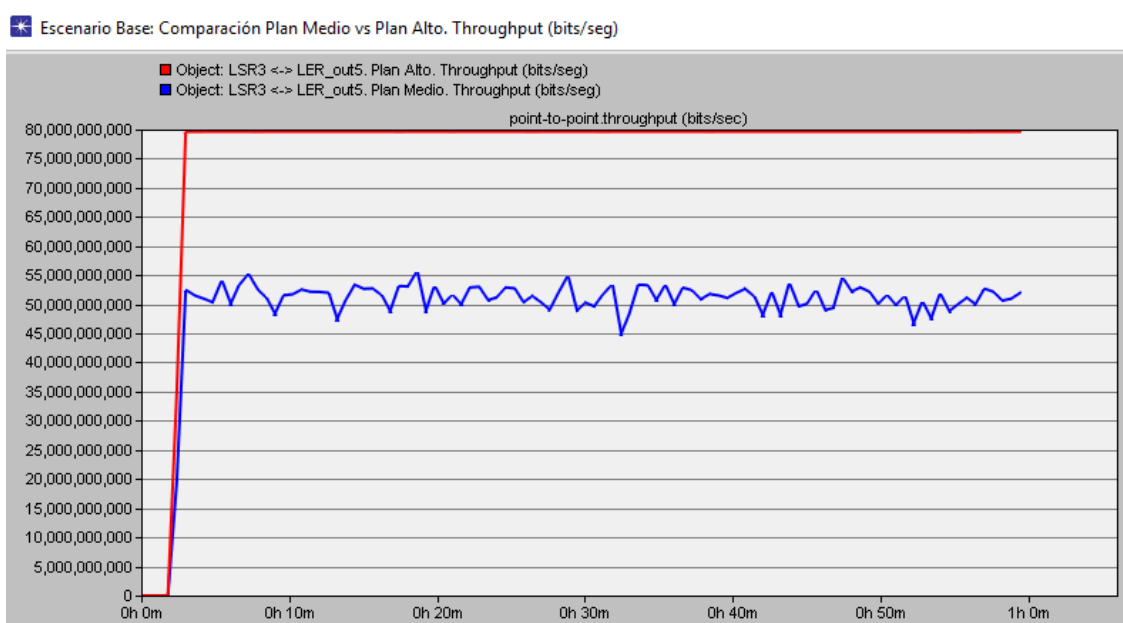
El enlace de *backup* si bien está subutilizado se mantiene con el 10% para garantizar en caso de caída de un equipo la recuperación del tráfico evitando pérdidas.

Con estos datos el porcentaje de utilización muestra un valor de 100% para el plan alto y un valor de 65% para un plan medio, se demuestra que si todos los suscriptores de la zona 4 contratarían un plan alto el escenario base no podría manejar de forma óptima el tráfico que cursará por la red núcleo, por lo que se podría tener deficiencias en la calidad que necesita cada servicio del *Triple Play*.

Se puede concluir que el enlace LSR2-LER\_out4 perteneciente a la red analizada para un plan alto se encuentra saturado.

### Segundo Caso:

En la Figura 4.98 se analiza el *throughput* del enlace LSR3-LER\_out5, en la curva azul se observa que el tráfico total para la zona es de 55 Gb aproximadamente si el plan es del tipo medio, en cambio para el plan alto el tráfico sobrepasa los 80 Gb que es el límite del enlace.

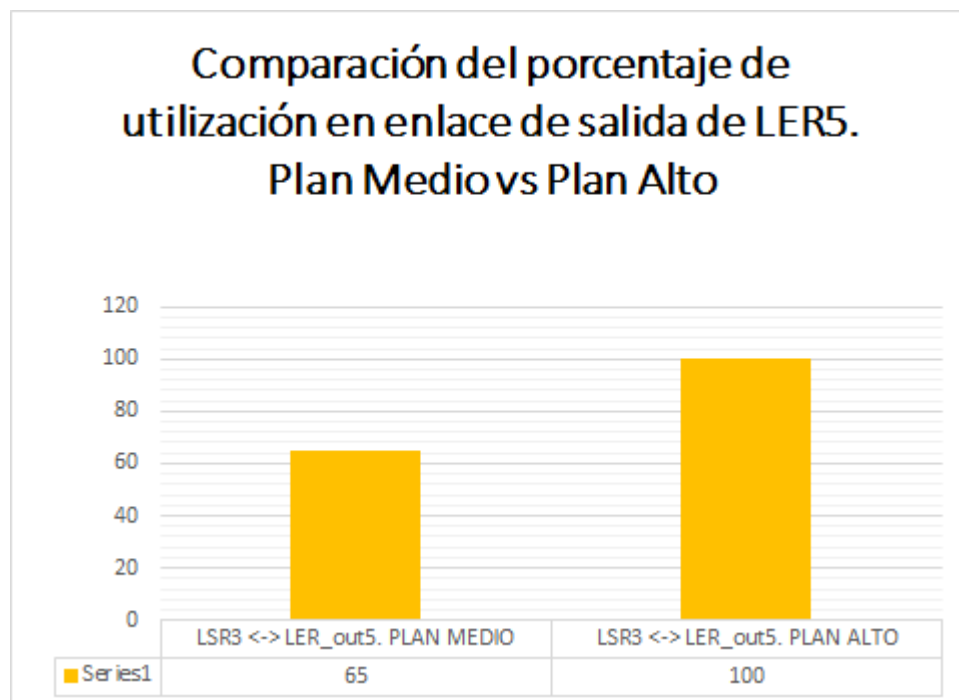


**Figura 4.98:** Escenario base: Comparación del *Throughput* entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR3-LER\_out5

Se analiza la utilización del enlace con LER de salida 5 (LER\_out5), el mismo muestra en la Figura 4.99 el porcentaje de utilización del enlace para el plan medio y alto, se observa que el porcentaje de utilización del 65 % aproximadamente corresponde al plan medio, en contraposición el plan alto muestra un porcentaje de utilización de 100% es decir está ocupado en su totalidad.

En la gráfica del *throughput* se detalla que el tráfico cuando se configura el plan alto es de 80 Gb este valor excede a la capacidad del enlace utilizado (79 Gb). Como se analizó en el primer caso de este escenario cada zona de las cinco en las que se divide a Cuenca tiene un tráfico de 82 Gb en el enlace principal.





**Figura 4.99:** Escenario base: Comparación del Porcentaje de Utilización entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR3-LER\_out5

Con este tráfico se supera la velocidad del enlace 79 Gbps. Con esto el retardo aumenta y la calidad de la señal puede verse afectado sobre todo para servicios como el de voz y televisión.

En el caso del porcentaje de utilización, se muestra para el plan alto un valor de 100% y un valor de 65% para un plan medio, en este caso si todos los suscriptores de la zona 4 contratarían un plan alto el escenario base no podría manejar de forma óptima el tráfico, por lo que la red podría tener deficiencias en la calidad que necesita cada servicio del *Triple Play*.

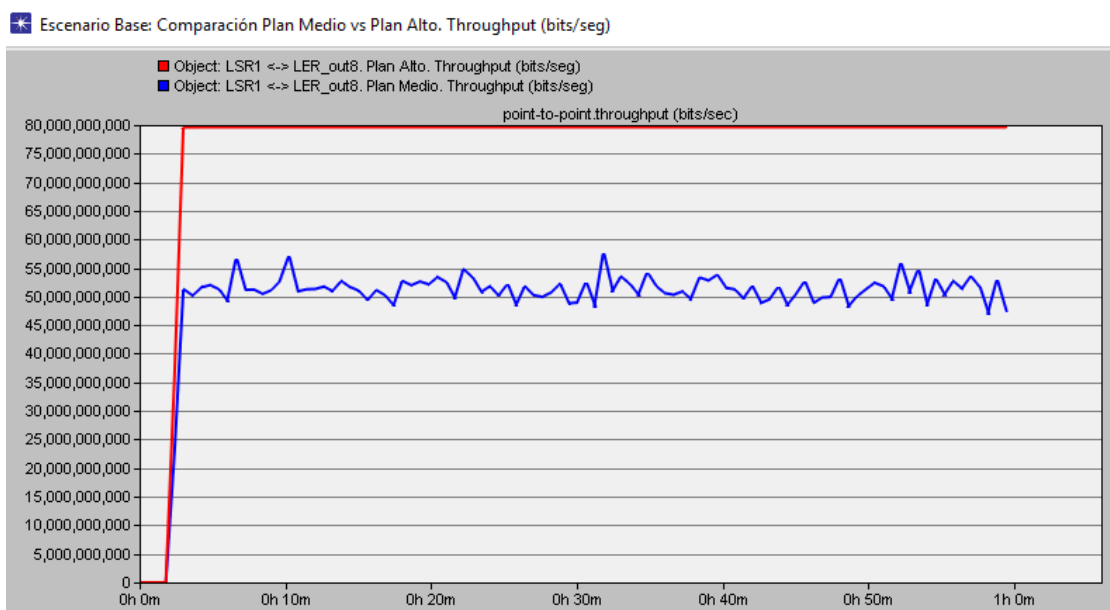
Se puede concluir que el enlace LSR3-LER\_out5 perteneciente a la red analizada para un plan alto se encuentra saturado.

### **Tercer Caso:**

Por último, se analiza el LER\_out8, dado que al estar la zona 4 repartida equitativamente en 5 zonas el comportamiento de cada enlace que va a un LER de salida debe ser similar.

El análisis del enlace LSR1-LER\_out8 se basa en el *throughput* total que circula

por la zona 4, en la gráfica siguiente (Figura 4.100) se observa en la curva roja que para un plan alto se ocupa 80 Gb, en anteriores puntos se determinó que cada sector de la zona 4 tiene un tráfico de 82 Gb, en la curva azul se observa que el tráfico total para un plan medio es de 55 Gb aproximadamente, este enlace representa el 90% del total de tráfico dado que se analiza la ruta principal.



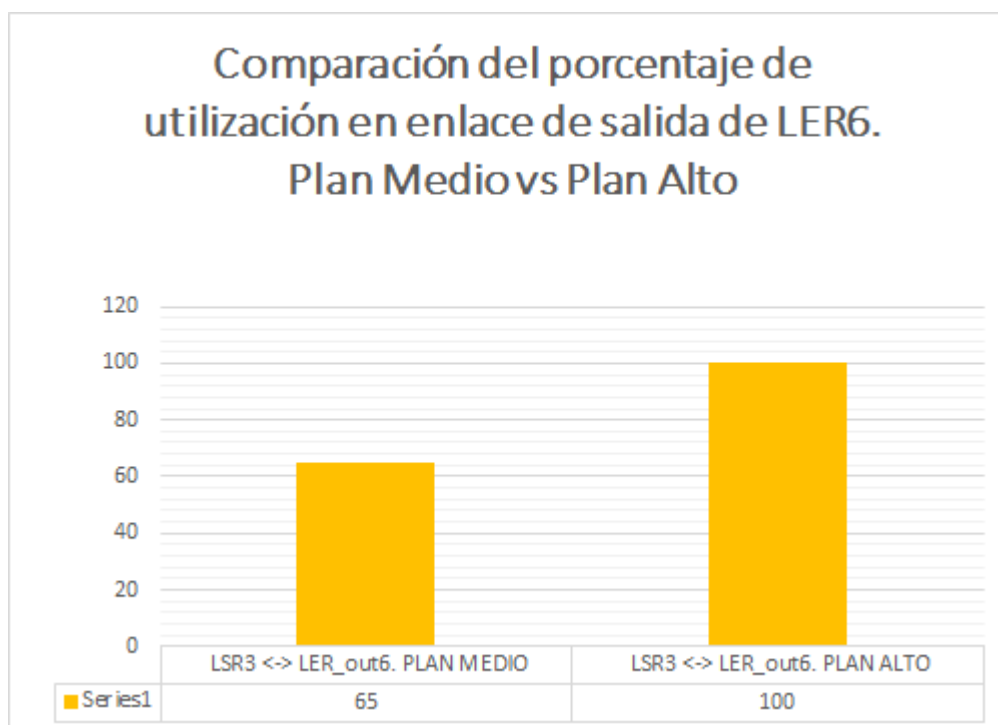
**Figura 4.100:** Escenario base: Comparación del *Throughput* entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR1-LER\_out8

La utilización del enlace LER de salida 8 (LER\_out8), se muestra en la Figura 4.101, en donde se representa el porcentaje de utilización del enlace para el plan medio y alto.

Se observa que el porcentaje de utilización del 65 % aproximadamente corresponde al plan medio, en contraposición con el plan alto que muestra un porcentaje de utilización de 100 % es decir ocupado en su totalidad.

En la gráfica del *throughput* se detalla que la cantidad de tráfico es mayor a la de la capacidad del enlace, cuando se configura un plan alto el valor promedio los 80 Gb.

Con este tráfico se supera la velocidad del enlace 79 Gbps. Con esto el retardo aumenta y la calidad de la señal puede verse afectado sobre todo para servicios como el de voz y televisión.



**Figura 4.101:** Escenario base: Comparación del Porcentaje de Utilización entre Plan Alto vs Plan Medio correspondiente al enlace LSR1-LER\_out8

Para el análisis del porcentaje de utilización, se muestra que en el plan alto se utiliza el 100% y para el plan medio el porcentaje de utilización es del 65%, en este caso si los suscriptores de la zona 4 contratarían un plan alto el escenario base no podría manejar de forma óptima el tráfico, por lo que la red podría tener deficiencias en la calidad que necesita cada servicio del *Triple Play*.

Se puede concluir que el enlace LSR3-LER\_out6 perteneciente a la red analizada para un plan alto se encuentra saturado.

Analizando los tres casos expuestos anteriormente se concluye que se debe diseñar un escenario solución que permita manejar el tráfico que genera el plan alto.

### **Escenario diseñado para plan alto:**

Después de analizar la red base con una demanda con plan alto se demuestra que el escenario puede presentar problemas frente a la calidad del servicio, para esto se ha diseñado una red alternativa basada en la red base.

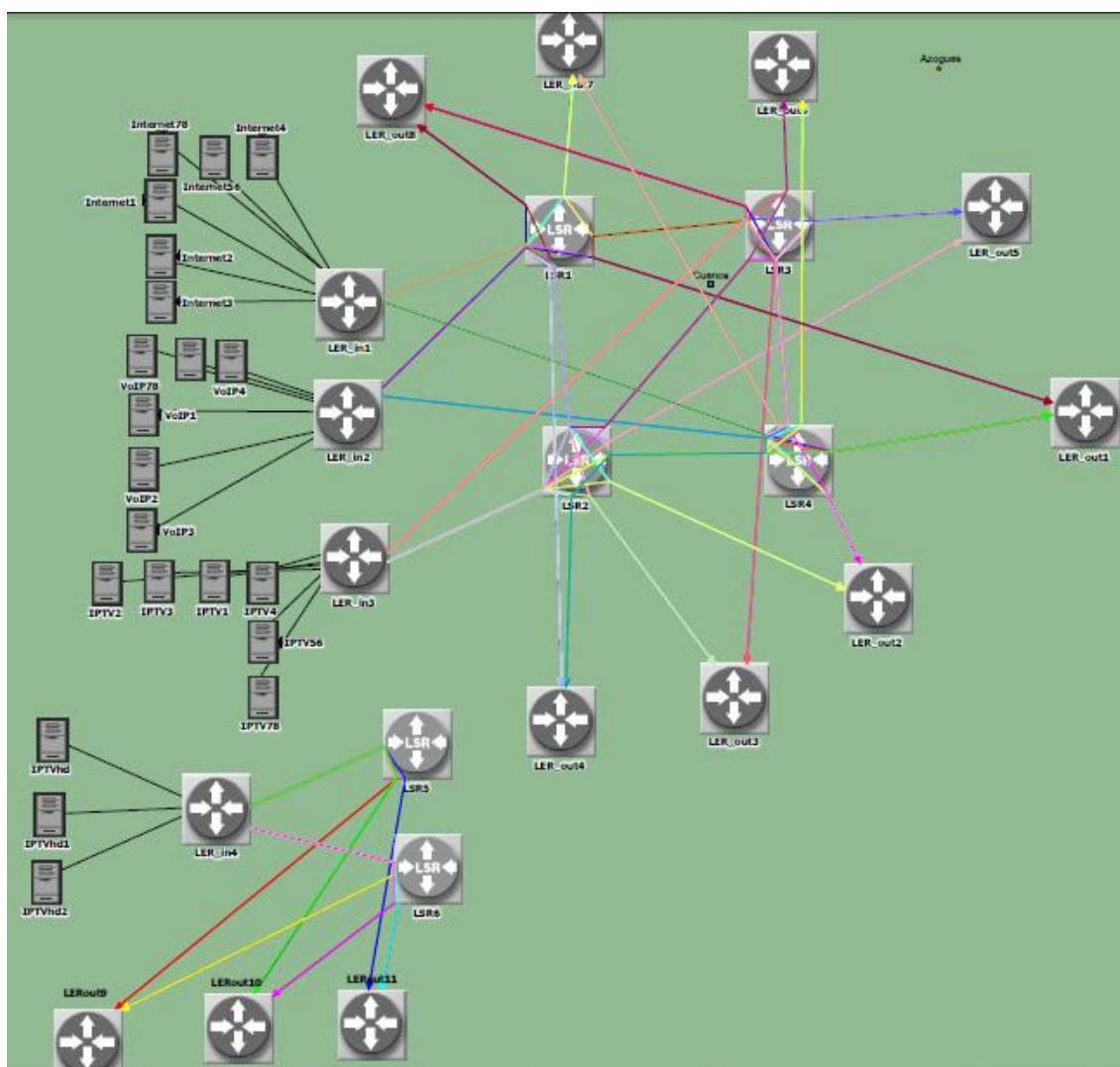
Dado que el escenario simula que los suscriptores de la zona 4 contratan un plan

alto, se ha planteado dividir la zona 4 en 8 LER de salida, con esto para el tráfico de televisión que es de 460 Gb como se observa en la tabla de MATLAB se tiene que cada LER de salida maneja  $460\text{Gb}/8 = 57.5\text{ Gb}$ .

Para el tráfico de Internet y voz se mantiene la misma configuración que en la red base, los nuevos LER de salida se denominan LER\_out9, LER\_out10, LER\_out11.

Se aumentan dos LSR que se comunicaran con los nuevos LER de salida, además se aumenta un LER de entrada, con esto se logra mantener una carga adecuada en cada equipo.

El escenario ampliado en relación a la red base es el siguiente:



**Figura 4.102:** Escenario Solución: Diseño de red solución en el caso del escenario con plan alto para la Zona 4

# **CAPITULO 5**

---

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## Conclusiones:

A continuación, se presentan las conclusiones de los capítulos 1 y 2:

En cuanto al cálculo del ancho de banda para el servicio de VoIP se ha escogido el códec G.729a dado que está estandarizado para aplicaciones de voz sobre ip, este códec utiliza una tasa de *bits* menor al códec G.711 utilizado para las comunicaciones de la red telefónica actual, si bien el códec G.711 con una tasa de *bits* mayor puede cuantificar la señal de voz con mayor precisión, el códec seleccionado mediante algoritmos de predicción lineal brinda una calidad adecuada en las llamadas.

En IPTV se ha seleccionado los códecs de la familia MPEG, los mismos que permiten una compresión de la señal de audio de alta calidad, MPEG-4 es actualmente el de mejores prestaciones dado que su compresión permite manejar canales HD a una tasa de *bits* baja lo que facilita su transmisión por la red IP, con esta compresión un plan de televisión con canales en alta definición ocuparía un ancho de banda menor, lo que permitiría un plan de negocios favorable tanto para el proveedor como para el suscriptor.

Para la realización de la simulación se ha elegido el *software* de simulación de redes OPNET, el cual presenta soporte de varios protocolos, generación de tráfico y amigable interfaz gráfica. En este proyecto se ha utilizado una versión antigua (2010 versión 14.5) gratuita que, si bien permitió culminar con éxito el proyecto, no posee todas las características que incluye el nuevo *software* de OPNET actualmente perteneciente a la empresa Riverbed.

Con respecto al diseño de la red, en el presente proyecto se ha realizado una aproximación lineal del crecimiento poblacional y la penetración de los servicios, tomando datos estadísticos presentados por entidades gubernamentales tales como ARCOTEL e INEC.

El tráfico de televisión ha sido enviado por *unicast*, lo cual es conveniente ya que cada usuario tiene acceso a un flujo de video independiente y por tanto puede adelantar, retroceder o pausar la reproducción; además de poder disponer del video cuando guste y no tener que esperar un horario de emisión regular. Por otra parte, el tráfico *unicast* presenta gran desventaja en cuanto a consumo de recursos. El ancho de banda requerido para brindar tráfico *unicast* es por mucho, superior al requerido para brindar *multicast*. En conclusión, al enviar tráfico *unicast* para el servicio de televisión es favorable para el usuario, ya que contaría con video bajo demanda, pero es

desfavorable para la ingeniería de la red, ya que representa un alto consumo de recursos.

Las conclusiones obtenidas en los escenarios simulados en el capítulo 4:

En el escenario de selección del mejor protocolo de red se ha realizado pruebas a la red con los protocolos: IP, MPLS y MPLS-TE. En cuanto al retardo de paquetes del servicio IPTV el desempeño de MPLS-TE mejoró en un 33% frente al protocolo MPLS y 58% con respecto al protocolo IP. En cuanto a VoIP se analizó la respuesta en el tiempo del retardo de paquetes de voz, dando como resultado que MPLS-TE presentó un retardo 60% menor en relación al retardo producido por el protocolo IP y un 50% menor con relación al protocolo MPLS. Para el servicio de Internet se analizó el tiempo de respuesta de una página HTTP, en este caso el protocolo MPLS-TE mejora en 12% con respecto a IP y un 7% con respecto a MPLS.

Después de seleccionar como protocolo de red al protocolo MPLS-TE se configuró la red con distintos mecanismos de gestión de colas, entre ellos: PQ, DWRR, WFQ. Se obtuvo los siguientes resultados: Se analizó el retardo de paquetes del servicio de IPTV en el cual se observó que el algoritmo WFQ mejoró en un 25% la respuesta en el tiempo frente a los algoritmos PQ y DWRR, los cuales mostraron un desempeño similar. También se analizó el retardo de paquetes de voz para el servicio de VoIP, en este caso, WFQ mejoró la respuesta en el tiempo en un 50% con relación a PQ y DWRR.

Con respecto a la simulación de fallas en los LSRs, se ha podido observar que cuando falla un solo LSR la red es capaz de recuperar el 100% del tráfico de los ocho LERs de salida.

Cuando se presenta fallas en dos equipos LSRs la red empieza a perder tráfico ya sea de voz, Internet o televisión dejando sin servicio a distintos sectores dependiendo cuales sean los *routers* que fallaron. Se ha determinado que el porcentaje de pérdida de tráfico en los LERs de salida varía desde un 15% hasta un 25% dependiendo de los LSRs que fallaron y los LSPs perdidos tras la caída de los enlaces.

Cuando la falla se presenta en tres LSRs se ha podido constatar que la red pierde la mayoría de su tráfico. La pérdida varía en cada uno de los ocho LERs de salida, con un detrimento máximo de 90% y mínimo de 60%.

La simulación de la fluctuación de tráfico en un día demostró que los enlaces

utilizados son propicios para la cantidad de tráfico que se pretende enviar. Hay períodos en los que los enlaces se encuentran con carga baja, 10% de utilización, tal como lo es durante las primeras horas de la mañana, mientras que, en las primeras horas de la noche o al medio día, podría darse el caso de una alta demanda de tráfico, 60% de utilización de los enlaces. Con un tráfico al 100% los enlaces principales presentan una utilización del 70%. Esto demuestra que los enlaces han sido correctamente dimensionados para la cantidad de tráfico que va a pasar por la red.

Bajo el supuesto caso de que los usuarios decidan un plan de servicios bajo en lugar de un plan de servicios medio como se había diseñado, se realizó una prueba generando un tráfico con un plan de servicios bajo y se envió a la red MPLS. Se observó que el tráfico generado tiene un porcentaje de utilización del enlace, correspondiente al 50% del porcentaje de utilización que produce el tráfico generado por un plan medio. Esto lleva a la conclusión de que la red MPLS base, para un plan de servicios bajo, se encuentra sobredimensionada, así que se crea un nuevo escenario con los equipos suficientes para dar soporte al nuevo flujo de tráfico. Este nuevo diseño de red cuenta con cuatro LSRs de salida en lugar de ocho.

Por otra parte, el escenario base también fue analizado con un plan alto basándose en el caso de que la población cuencana contrate este plan. Al observar los resultados se determinó que el escenario base puede presentar problemas frente a la calidad del servicio, demostrándose que los enlaces hacia cada LER de salida sobrepasan el 100% de utilización lo que produce una sobresaturación de la red. Como solución, se diseñó una red alternativa para este escenario optimista, a partir de la red base. Esta nueva red consiste en ocho LERs de salida y seis LSRs para soportar el nuevo tráfico de la ciudad de Cuenca.

### **Recomendaciones:**

En cuanto al *software* de simulación de redes se recomienda comprar la licencia de OPNET SP Gurú Network Planner, la cual se puede conseguir en la página oficial [www.riberved.com](http://www.riberved.com). El *software* con licencia permite tener acceso a mayores prestaciones, tales como el análisis del flujo de tráfico, herramienta que es de gran utilidad al momento de simular redes con MPLS.

Para el dimensionamiento de la red, si se desea una aproximación con mayor exactitud se recomienda realizar encuestas a los habitantes de la provincia del Azuay, sobre su conocimiento acerca del servicio integrado *Triple Play* y la posibilidad de



contratación del servicio.

El tráfico de IPTV ha sido enviado mediante *unicast* permitiendo a los usuarios tener acceso a video bajo demanda, sin embargo, si se desea reducir la carga de ancho de banda en la red, se puede considerar el envío de paquetes mediante diferentes técnicas de *multicast*.

Para la elección de los equipos se recomienda revisar los catálogos de otras marcas tales como son: Juniper, HP, Alcatel, Huawei, entre otros. Debido a que, si bien todos los equipos tienen el mismo principio de funcionamiento, la complejidad de configuración, el tiempo de vida del hardware y los precios varían según las marcas.

Para los enlaces, se eligió interfaces de alta velocidad, el administrador puede elegir si usar un solo enlace de 100Gbps, o usar 10 enlaces de 10 Gbps, lo cual, sería recomendable en términos de redundancia y disponibilidad.

Basados en los resultados se recomienda al administrador de la red, ante la falla de un *router*, trabajar inmediatamente para recuperar el nodo perdido y no dar espacio a la caída de un segundo equipo.

### **Trabajos futuros:**

Automatizar la extracción de datos generados por OPNET. Si el usuario desea tener acceso a los datos generados a partir de las gráficas, es necesario realizarlo manualmente, utilizando el mouse. Sin embargo, al ejecutar una simulación, OPNET almacena los datos en un archivo con formato binario .ov y .os. Se puede trabajar sobre estos archivos para automatizar la recolección de datos permitiendo así un mejor estudio sobre el desempeño de la red.

Programar la generación de tráfico, que para el presente proyecto ha sido realizado en MATLAB, utilizando las herramientas de programación en el lenguaje C, que dispone OPNET.

Realizar simulaciones más específicas sobre cada uno de los servicios *Triple Play*. Por ejemplo, en el caso de VoIP, las llamadas en tiempo real. En IPTV, simulaciones comparativas en cuanto al envío de paquetes con técnicas de *multicast* y *unicast*.

# **BIBLIOGRAFÍA**

---

- [1] U. of S. C. Institute Information Sciences, "RFC:791 INTERNET PROTOCOL (Protocolo Internet)." 1999.
- [2] A. G. Yague, "MPLS - Multiprotocol Label Switching," vol. Version 3., 2002.
- [3] "ATM (Modo de Transferencia Asíncrona) - Monografias.com," 2014. [Online]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos/atm/atm.shtml>.
- [4] AGUSTÍN J. GONZÁLEZ, Multi-Protocol Label Switching, Dept. of Computer Science, UMBC, University of Maryland
- [5] Goimbra G. Edison, "Red de transporte MPLS," *Power*, no. Cc, pp. 1–14, 2010.
- [6] U. of S. C. Institute Information Sciences, "RFC:3031 Multiprotocol Label Switching Architecture." 2001.
- [7] CISCO, "MPLS FAQ For Beginners." [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/multiprotocol-label-switching-mpls/mpls/4649-mpls-faq-4649.html#qa1>.
- [8] G. Araujo, "MPLS (Multiprotocol Label Switching)," pp. 1–9.
- [9] CISCO, "CISCO, MPLS Introduction." [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/tech/multiprotocol-label-switching-mpls/mpls/index.html>.
- [10] J. Peralta, "MPLS (Multi Protocol Label Switching)," 2012. [Online]. Available: [https://prezi.com/acr\\_j2s2ofmt/mpls-multi-protocol-label-switching/](https://prezi.com/acr_j2s2ofmt/mpls-multi-protocol-label-switching/).
- [11] M. S. Canalis, "MPLS 'Multiprotocol Label Switching': Una Arquitectura de *Backbone* para la Internet del Siglo XXI," p. 20.
- [12] "Migración a MPLS ¿Por qué? ¿Cuándo? ¿Cómo?," *NetworkWorld*, 2007. [Online]. Available: <http://www.networkworld.es/networking/migracion-a-mpls-por-que-cuando-como>.
- [13] L. Ghein, MPLS Fundamentals, Cisco Press, USA, 2006
- [14] CISCO and G. Lavado, "MPLS - Multiprotocol Label Switching: Introducción al protocolo y características," 2015. [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/GianpietroLavado/mpls-multiprotocol-label-switching-v13?related=1>.
- [15] L. Morales Dibildox, "Investigación de redes VPN con tecnología MPLS," *Capítulo 2*, pp. 6–67, 2006.
- [16] D. Rubio Sánchez, "Modelado y Simulación de un Conmutador MPLS (MultiProtocol Label Switching) utilizando VHDL," *Capítulo 2*, pp. 1–9, 2004.
- [17] C. Hidalgo, D. Laguapillo; Diseño e implementación de un laboratorio que permita emular y probar servicios IP y MPS de la red de *backbone* CISCO de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT, 2011.
- [18] M. O. Tapasco García, "MPLS, El presente de las redes IP," pp. 1–149, 2008.
- [19] T. García Reyes, "Análisis de modelos de servicios diferenciales y servicios integrales para brindar QoS en Internet," pp. 1–88, 2007.
- [20] R. Paucar, "Calidad de Servicio (QoS)"
- [21] M. A. Azate, "Conceptos de probabilidad, variables aleatorias y procesos estocásticos en redes de comunicaciones: VII. Teoría de colas," pp. 1–8.
- [22] J. Gonzalez Mendez, "Análisis y diseño de una técnica de calendarización para redes Wimax móviles basadas en el estándar IEEE 802.16e," pp. 1–137, 2011.
- [23] Estándar ITU-T, "Estándar Y.2001 Redes de Nueva Generación", 2005.
- [24] J. De Urza, "Triple-Play: convergencia de Medios", Asunción-Paraguay, 2011.
- [25] S. Abdullah, "Performance Analysis of Triple Play Services over IP Using OPNET Simulator", Baghdad-Irak, 2010.
- [26] C. Illescas, "Estudio previo para la implementación del sistema Triple Play en una red hfc de la empresa servicable", Cuenca-Ecuador 2011.
- [27] F. Hens, J. Caballero, "Triple Play : Building the Converged Network", John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra, 2008.
- [28] Estándar ITU-T, "Tiempo de transmisión en un sentido - ITU", 2004.



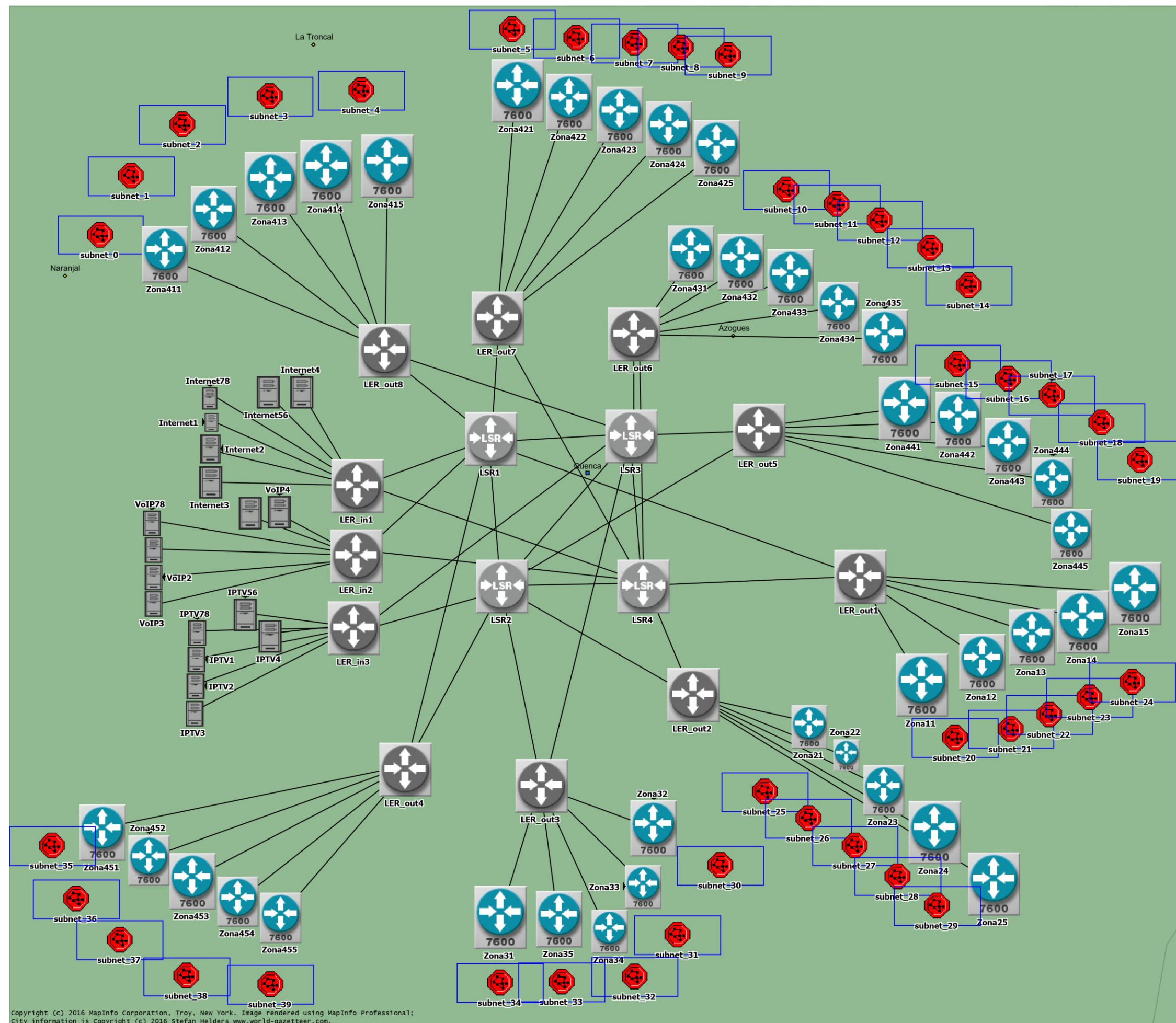
- [29] Cisco, "Voz sobre IP - Consumo de ancho de banda por llamada", 2006.  
[Online]. [http://www.cisco.com/cisco/web/support/LA/7/73/73295\\_bwidth\\_consume.html](http://www.cisco.com/cisco/web/support/LA/7/73/73295_bwidth_consume.html)
- [30] A. Aluwihare, J. Beckman, R. Flask, E. Kerch, J. Laferriere, M. Mekic, J. Nerschook, N. Parbhakar, T. Ward and J. Williams, "*Triple Play* Service Deployment: A Comprehensive Guide to Test, Measurement, and Service Assurance", JDS Uniphase Corporation, 2007.
- [31] C. Núñez, J. Fruto, Y. Meisel, "Extended IPTV Transmission Performance Analysis over ADSL, WiFi and Land Extended", Universidad del Norte, Colombia, 2010.
- [32] Estándar ITU-T Y.1541, "Series y: Global information infrastructure, Internet protocol aspects and next-generation networks", 2011.
- [33] R.N. van Wolfswinkel, "Requirements of *Triple Play* Services towards Broadband Access Networks", TNO Telecom report 33504, 2005.
- [34] A. García, J. Cuellar, "Calidad de servicio en proveedores de servicios IPTV", Cali-Colombia, 2012.
- [35] A. García, M.Sc., "Método de evaluación y selección de herramientas de simulación de redes", Universidad Icesi, Revista Sistemas y Telemática. ,2011.
- [36] M. Herrera, "NS2 Network Simulator", Valparaiso, 2004.
- [37] "Web oficial NS3." [Online]. Available: <https://www.nsnam.org>.
- [38] M. Fuzner, "GNS3- Graphical Network Simulator", Version 1.0, 2011.
- [39] "Web oficial GNS3." [Online]. Available: <https://www.gns3.com/>.
- [40] A. Varga, "OMNeT++ Installation Guide", Version 4.
- [41] A. Varga, "The OMNET++ discrete event simulation system", Department of Telecommunications Budapest University, Budapest, Hungary.
- [42] "Web oficial OPNET." [Online]. Available: <http://www.riverbed.com/>.
- [43] SYSC 4005/5001 Simulation and modeling, "Introduction to Using OPNET Modeler"
- [44] L. Fernández, "Control de congestión con OPNET", Ingeniería Técnica en informática y sistemas, Universidad de Valladolid.
- [45] Network Working Group RFC 3550, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", Columbia University, 2003
- [46] Network Working Group RFC 3605, "Real Time Control Protocol (RTCP) attribute in Session Description Protocol (SDP)", Columbia University, 2003
- [47] Cisco Networking Academy. CCNA3. Capítulo 1. Escalamiento de Redes.
- [48] "Sitio oficial del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, INEC Ecuador." [Online]. Available: <http://www.inec.gob.ec>.
- [49] Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Cuenca, "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial," p. 243, 2011.
- [50] "Sitio oficial Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, ARCOTEL Ecuador." [Online]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec>.
- [51] "Sitio oficial ETAPA EP." [Online]. Available: <http://www.etapa.net.ec>.
- [52] CISCO, "End-of-Life Policy." [Online]. Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/eos-eol-policy.html>.
- [53] CHIQUI Mauricio, "Estudio de factibilidad de IPTV en la red IP/MPLS de ETAPA EP utilizando VPN/MPLS", 2015.

# **ANEXOS**

---



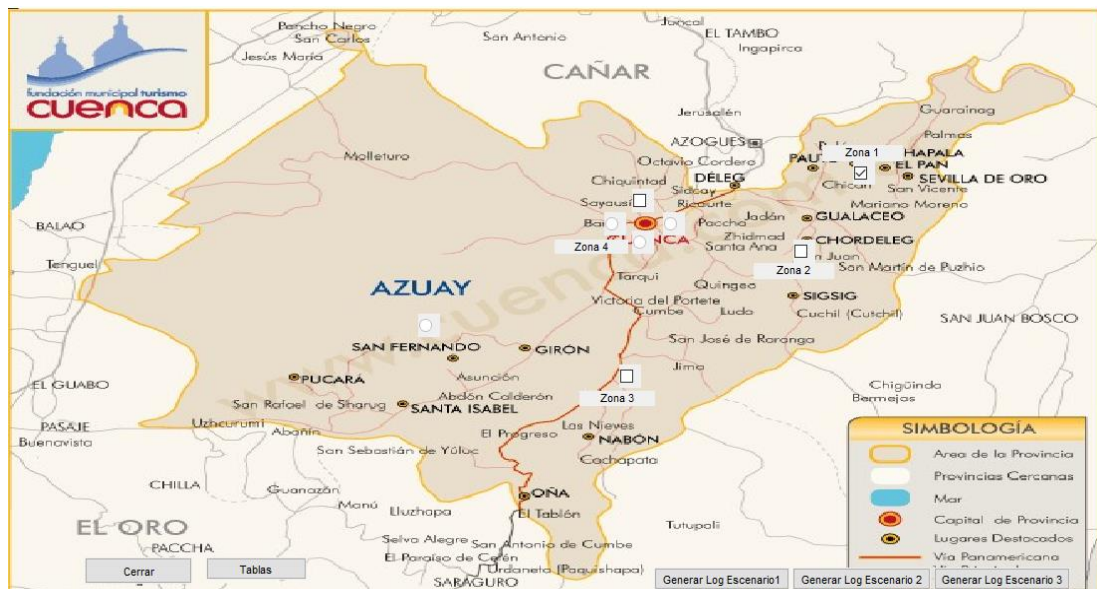
## ANEXO A. DISEÑO DE LA RED NÚCLEO



## ANEXO B: Manual de usuario

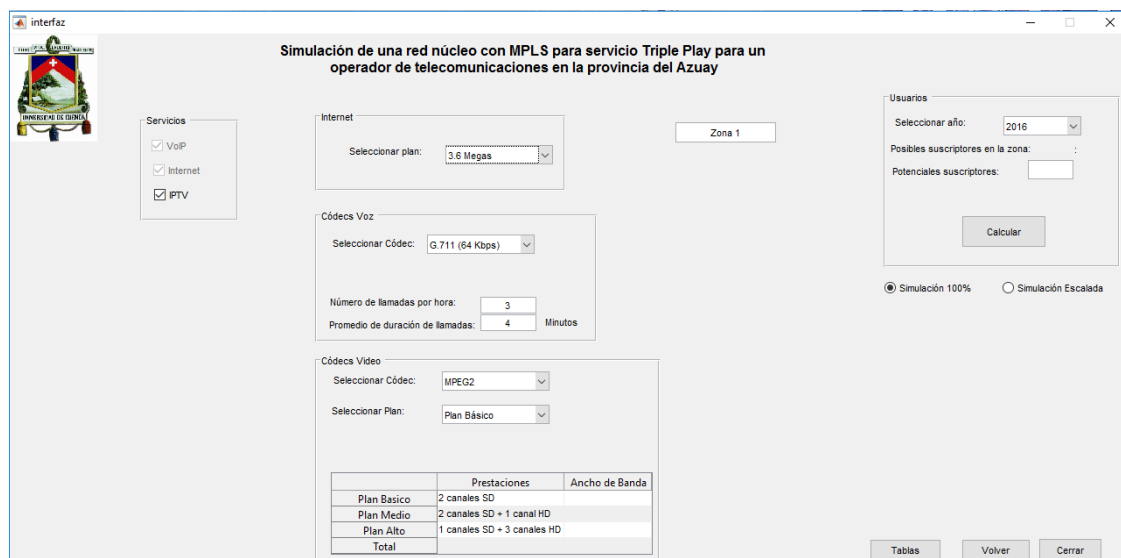
Se detalla el uso de la interfaz de MATLAB para generar el tráfico, así como la vinculación con OPNET.

Primero se elige la zona para la cual se desee realizar el estudio de tráfico. Se muestra un mapa con varios checks, uno por cada zona. Se activa el de la zona deseada.



**Figura B.1:** Interfaz Gráfica MATLAB configuración Zonas

A continuación, se abre una nueva ventana en la cual se puede ingresar los datos deseados para la generación de tráfico.



**Figura B.2:** Interfaz Gráfica MATLAB Interfaz Servicio *Triple Play*

En los gráficos siguientes se explica cada uno de los paneles de la interfaz anterior.

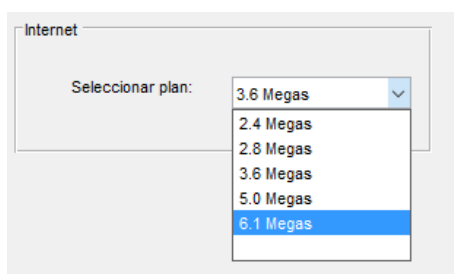
- **Panel de servicios:** Se selecciona los servicios para los cuales se desea realizar la generación de tráfico. Los servicios de Internet y VoIP vienen seleccionados por defecto,

ya que los usuarios de Internet lo serán también del servicio de voz. Todos los usuarios del servicio de Internet podrían en lo posterior contratar o no el servicio de televisión.



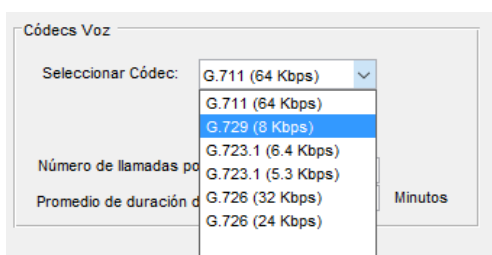
**Figura B.3:** Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicios *Triple Play*

- *Servicio de Internet:* Para el servicio de Internet se puede seleccionar el plan según la cantidad de Megas que se desee brindar a cada usuario.

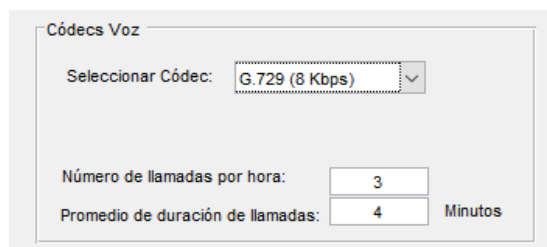


**Figura B.4:** Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicio Internet

- *Servicio de voz:* En cuanto al servicio de voz el administrador puede seleccionar el códec con el que desee codificar el servicio, además de elegir el número de llamadas por hora y el promedio de duración de llamadas.



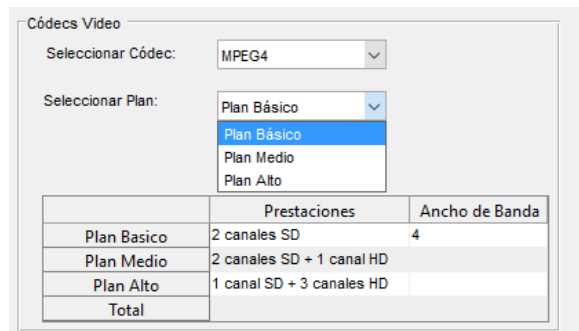
**Figura B.5:** Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicio VoIP



**Figura B.6:** Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicio VoIP

- *Servicio de televisión:* Para el servicio de televisión, se elige el códec con el que se desea codificar el video, además se elige el plan.





	Prestaciones	Ancho de Banda
Plan Básico	2 canales SD	4
Plan Medio	2 canales SD + 1 canal HD	
Plan Alto	1 canal SD + 3 canales HD	
Total		

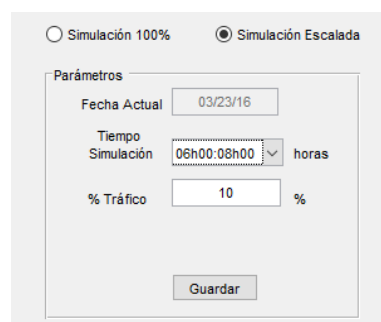
**Figura B.7:** Interfaz Gráfica MATLAB configuración servicio IPTV

En el panel de usuarios el administrador selecciona el año para el cual desea realizar el dimensionamiento de la red.



**Figura B.8:** Interfaz Gráfica MATLAB configuración suscriptores según el año

En la parte inferior del panel de usuarios se observa dos Radio Button, si el administrador selecciona la primera opción, *Simulación 100%*, significa que en el archivo de texto se va a generar todo el tráfico posible según los parámetros escogidos, mientras que, si se selecciona la segunda opción, *Simulación Escalada*, se va a generar un tráfico diferente en distintas horas del día; para esto, se despliega un nuevo panel que permite seleccionar ciertos parámetros, se muestra en la gráfica a continuación.



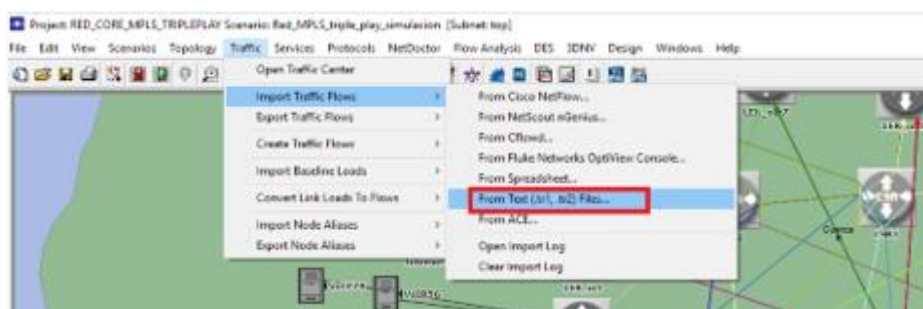
**Figura B.9:** Interfaz Gráfica MATLAB configuración tráfico a lo largo del día

El parámetro *Tiempo de simulación* permite al usuario escoger un rango de tiempo para el cual puede seleccionar el porcentaje de tráfico que desea enviar mediante el parámetro *% Tráfico*.

Después de la configuración de los usuarios y el cálculo del tráfico en MATLAB, se realiza

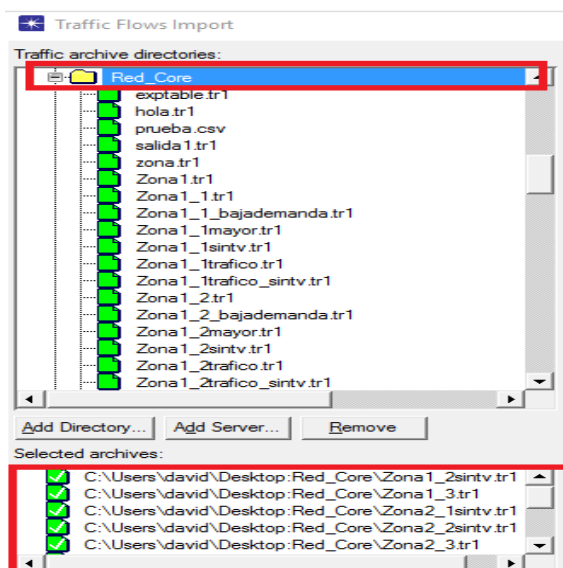
la vinculación con el OPNET. MATLAB genera archivos .tr1, estos archivos pueden ser importados desde el OPNET. El contenido de los archivos generados en MATLAB son el tráfico calculado en *bits/seg* y el tiempo de duración de dicho tráfico esto para cada una de las zonas en las que se ha dividido la red.

Para acceder a la herramienta de importar tráfico se abre la pestaña “Traffic” se dirige a “Import Traffic Flows” y se escoge la opción “From Text”. En la siguiente Figura se muestra como acceder a esta herramienta.



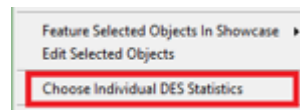
**Figura B.10:** OPNET importación tráfico generado en MATLAB

Una vez abierta la ventana, se muestra la información de la herramienta; en el panel izquierdo se encuentra el directorio del equipo PC, en el panel inferior izquierdo se observa los archivos a importar. En la parte derecha se observa la información del archivo a importar como es el tiempo de duración de la simulación.



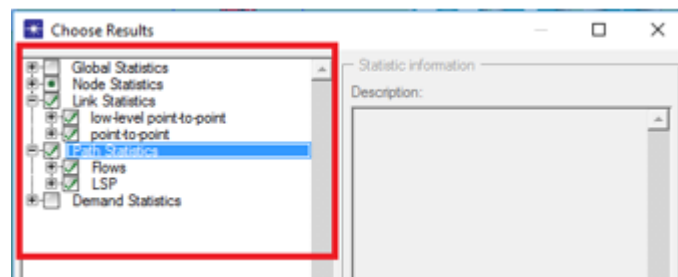
**Figura B.11:** OPNET selección de los archivos generados en MATLAB para importación tráfico

Después de realizar la configuración del tráfico se escoge los parámetros que serán analizados, para esto se da clic derecho en el escritorio del OPNET y se señala la opción que se muestra en la siguiente Figura.



**Figura B.12:** Selección de las estadísticas a analizar en la simulación

A continuación, se abre una ventana que muestra los parámetros que serán evaluados en la simulación, en este caso se analizan las estadísticas en los enlaces y en las LSP.



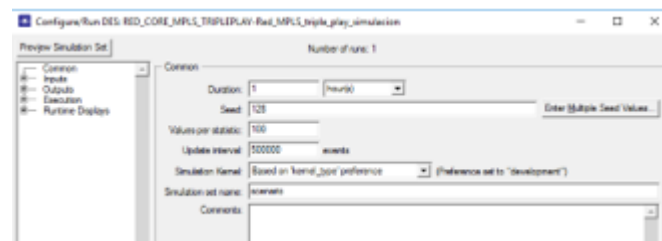
**Figura B.13:** Selección de las estadísticas a analizar en la simulación

Una vez seleccionado los parámetros se dirige a la barra de herramientas y se localiza la opción que se muestra en la siguiente imagen, la misma permite simular la red en el OPNET.



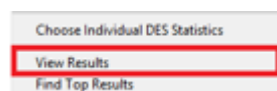
**Figura B.14:** Herramienta de OPNET para simular la red núcleo

En la ventana que se abre se selecciona el tiempo que se va a simular la red, se presiona en aceptar y se espera que el software indique que ha terminado de ejecutar el proceso.



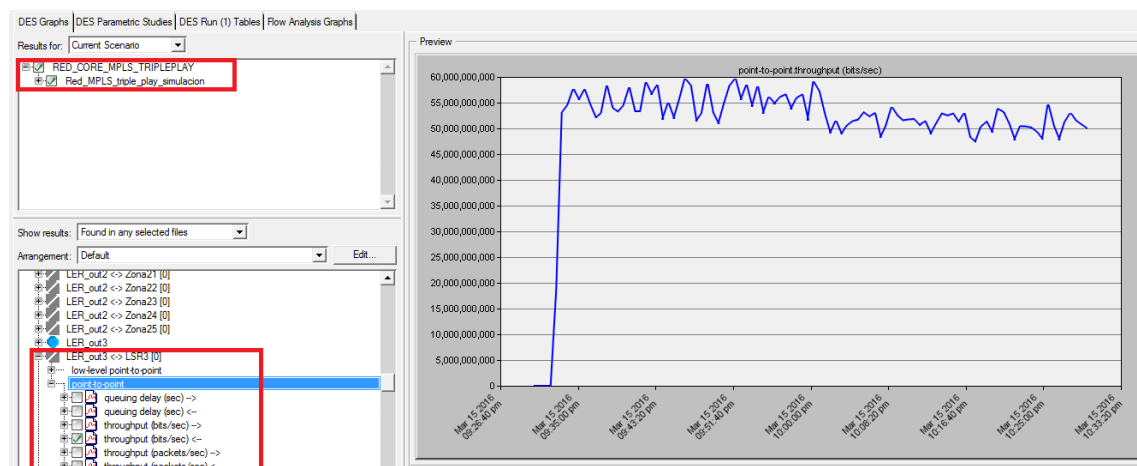
**Figura B.15:** Configuración de tiempo de simulación para la red núcleo

Por último, para analizar los resultados, se da clic derecho en la pantalla se selecciona View Results.



**Figura B.16:** Análisis de los resultados mediante herramienta View Results en OPNET

En los resultados aparecen en el panel superior izquierdo el escenario que se ha simulado y del cual se va a extraer los resultados, además en la parte inferior se observa el nombre de cada uno de los equipos y sus respectivos parámetros simulados, para observar un resultado en específico se selecciona el nombre del equipo y la estadística a analizar.



**Figura B.17:** Análisis de los resultados mediante herramienta View Results en OPNET